

ESTUDIO DE CARRIER AGGREGATION PARA OPTIMIZAR EL USO DEL ESPECTRO ASIGNADO A LOS
OPERADORES MÓVILES EN COLOMBIA

DIANA CAROLINA ORTÍZ CASALLAS
JOSÉ JHONATAN GÓMEZ SAAVEDRA

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2016

ESTUDIO DE CARRIER AGGREGATION PARA OPTIMIZAR EL USO DEL ESPECTRO ASIGNADO A LOS
OPERADORES MÓVILES EN COLOMBIA

DIANA CAROLINA ORTÍZ CASALLAS
JOSÉ JHONATAN GÓMEZ SAAVEDRA

Trabajo de grado para optar al título de
Especialista en Telecomunicaciones

Asesora
Ángela Marcela Mejía Fajardo, D. Eng.

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
FACULTAD DE TELECOMUNICACIONES
ESPECIALIZACIÓN EN TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ
2016

Nota de aceptación:

Firma del tutor del proyecto

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C, Marzo de 2016.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirnos alcanzar otro peldaño más en nuestras vidas y por regalarnos cada día más las ganas de luchar por nuestros sueños.

A nuestros padres, por apoyarnos en este proceso de formación tan importante para nosotros, por creer siempre en nuestras capacidades a pesar de las dificultades que se nos presentaron en este camino.

A nuestra directora de proyecto de grado, Marcela Mejía Fajardo, D. Eng, quien siempre estuvo muy atenta y dispuesta a brindarnos el completo apoyo con sus conocimientos, sugerencias y comentarios durante este proceso.

A la Universidad Piloto de Colombia y a nuestros profesores, por acogernos en sus aulas de formación y brindarnos la oportunidad de formarnos como especialistas íntegros y competitivos.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2. JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS.....	14
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
4. MARCO TEÓRICO.....	15
4.1 LONG TERM EVOLUTION	15
4.1.1 Arquitectura general del sistema LTE.	17
4.1.1.1 User Equipment y Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network.....	18
4.1.1.2 Evolved Packet Core.	19
4.1.2 Nivel físico.	20
4.1.2.1 Orthogonal Frequency-Division Multiple Access.	20
4.1.2.2 Single Carrier Frequency Division Multiple Access.	20
4.1.3 Estructura de la trama.	21
4.1.4 Modulación.	22
4.1.5 Protocolos de radio.	23
4.1.5.1 Protocolos en la interfaz de radio.....	23
4.1.5.2 Protocolos en las interfaces S1 y X2.	25
4.1.6 Bandas de operación en LTE.....	26
4.2 EVOLUCIÓN DE CARRIER AGGREGATION	27
4.2.1 Release 7.	28
4.2.2 Release 8.	29
4.2.3 Release 9.	30
4.2.4 Release 10.	31
4.2.5 Release 11.	31

4.2.6	Release 12.	33
4.2.7	Release 13.	34
4.3	LTE-ADVANCED CARRIER AGGREGATION	36
4.3.1	Principios de operación.	36
4.3.2	Tipos de Carrier Aggregation.	37
4.3.2.1	Agregación intra-banda con componentes contiguas.	37
4.3.2.2	Agregación intra-banda con componentes no contiguas.	38
4.3.2.3	Agregación inter-banda con componentes no contiguas.	38
4.3.3	Escenarios de implementación.	39
4.3.3.1	Escenario 1.	39
4.3.3.2	Escenario 2.	39
4.3.3.3	Escenario 3.	40
4.3.3.4	Escenario 4.	40
4.3.4	Configuraciones de Carrier Aggregation.	40
4.3.5	Ancho de banda del canal.	49
4.3.5.1	Clases de anchos de banda para Carrier Aggregation.	49
4.3.5.2	Configuraciones de Carrier Aggregation según el ancho de banda del canal.	51
5.	ESTADO DE ARTE DE LA IMPLEMENTACIÓN DE CARRIER AGGREGATION EN EL MUNDO	61
6.	DESARROLLO DEL PROYECTO	69
6.1	ASIGNACIÓN ACTUAL DEL ESPECTRO EN COLOMBIA	69
6.2	ANÁLISIS DE CARRIER AGGREGATION PARA LOS PRINCIPALES OPERADORES MÓVILES EN COLOMBIA	75
6.2.1	Claro -Comunicación Celular S.A.	77
6.2.1.1	Escenario 1. Combinación CA_2A-5A.	78
6.2.1.2	Escenario 2. Combinación CA_5A-7A.	78
6.2.1.3	Escenario 3. Combinación CA_2A-2A.	78
6.2.1.4	Escenario 4.	79
6.2.2	Movistar - Colombia Telecomunicaciones S.A.	79
6.2.2.1	Escenario 1. Combinación CA_2A-4A.	79
6.2.2.2	Escenario 2. Combinación CA_2A-5A.	80
6.2.2.3	Escenario 3. Combinación CA_4A-5A.	80

6.2.2.4	Escenario 4. Combinación CA_2A-2A.....	80
6.2.2.5	Escenario 5. Combinación CA_2A-4A-5A.	81
6.2.3	Tigo - Colombia Móvil.....	81
6.2.3.1	Escenario 1. Combinación CA_2A-2A.....	82
6.2.3.2	Escenario 2. Combinación CA_2A-4A.....	82
7.	RECOMENDACIONES A LOS OPERADORES MÓVILES.....	83
7.1	CLARO -COMUNICACIÓN CELULAR SA.....	83
7.2	MOVISTAR - COLOMBIA TELECOMUNICACIONES SA.....	85
7.3	TIGO - COLOMBIA MÓVIL	86
8.	RECOMENDACIÓN A LA REGULACIÓN COLOMBIANA	88
8.1	REORGANIZACIÓN DE FRECUENCIAS.....	88
8.1.1	Banda 5 (850 MHz).	88
8.1.2	Banda 2 (1900 MHz).	89
8.1.3	Banda 7 (2500 MHz).	91
8.1.4	Banda 4 (AWS).....	92
8.1.5	Banda 700 MHz (dividendo digital).....	92
8.2	MODIFICACIÓN DE LOS TOPES EL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO	93
9.	CONCLUSIONES	97
	BIBLIOGRAFÍA.....	99

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.Arquitectura de red en LTE.....	18
Figura 2. Estructura de la trama en LTE (downlink).....	21
Figura 3. Estructura del bloque de recursos.....	22
Figura 4. Protocolos de la interfaz de radio E-Utran	24
Figura 5. Protocolos en las interfaces S1 y X2	26
Figura 6. Evolución de Tecnología H+ a LTE.....	28
Figura 7. Evolución de throughput en HSPA con Carrier Aggregation para downlink y uplink.....	29
Figura 8. Agregación de 3 portadoras en downlink con Carrier Aggregation	34
Figura 9. Evolución de Carrier Aggregation en 3GPP	36
Figura 10. Tipos de Carrier Aggregation	38
Figura 11. Escenario 1 de implementación de CA	39
Figura 12. Escenario 2 de implementación de CA	40
Figura 13. Escenario 3 de implementación de CA	40
Figura 14. Escenario 4 de implementación de CA	41
Figura 15. Ancho de banda del canal y configuración del NRB para una portadora en E-UTRA.....	50
Figura 16. Convenciones y nomenclatura usada para la configuración CA	51
Figura 17. Pruebas de velocidad de Entel Chile.....	64
Figura 18. Canalización de la banda de 1900 MHz en Colombia	72
Figura 19. Asignación actual del espectro	74
Figura 20. Distribución de frecuencias actual en 850 MHz, 1900 MHz, AWS y 2500 MHz	74
Figura 21. Recomendación de reorganización de la banda 5	89
Figura 22. Recomendación de reorganización de la banda 2	91
Figura 23.Recomendación de reorganización de la banda 7	91
Figura 24. Asignación actual de frecuencias en la banda AWS.....	92
Figura 25. Propuesta de segmentación para la banda del dividendo digital	93

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Velocidades pico posibles en función de la canalización para 64QAM	23
Cuadro 2. Bandas de operación en E-Utran	26
Cuadro 3. Categoría de HSPA en los terminales	32
Cuadro 4. Velocidades de descarga para CA de acuerdo al ancho de banda total agregado	37
Cuadro 5. Configuración Carrier Aggregation intra-banda contigua según release 10.....	42
Cuadro 6. Configuración Carrier Aggregation Inter-banda no contigua según release 10	42
Cuadro 7. Configuración Carrier Aggregation intra-banda contigua según release 11.....	42
Cuadro 8. Configuración Carrier Aggregation inter-banda según release 11	43
Cuadro 9. Configuración Carrier Aggregation intra-banda no contigua según release 11	44
Cuadro 10. Configuración Carrier Aggregation intra-banda contigua según release 12.....	44
Cuadro 11. Configuración Carrier Aggregation inter-banda dos bandas según release 12	45
Cuadro 12. Configuración Carrier Aggregation inter-banda tres bandas según release 12.....	47
Cuadro 13. Configuración Carrier Aggregation intra-banda no contigua con dos sub-bloques según release 12.....	49
Cuadro 14. Relación entre el ancho de banda de transmisión y la configuración del NRB en E-UTRA	49
Cuadro 15 .Clases de ancho de banda usados en Carrier Aggregation	50
Cuadro 16. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para intra-banda contigua	52
Cuadro 17. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con dos bandas.....	54
Cuadro 18. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con tres bandas.....	58
Cuadro 19 .Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para intra-banda no contigua con dos sub-bloques.....	60
Cuadro 20. Relación de velocidades de descarga teóricas junto con los bloques de espectro utilizados	64
Cuadro 21. Combinaciones de Carrier Aggregation implementadas en el mundo	65
Cuadro 22. Participantes que resultaron adjudicados y sus respectivos bloques de espectro.....	72
Cuadro 23. Bandas de frecuencia asignadas a los operadores móviles en Colombia.....	75
Cuadro 24. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con dos bandas.....	76
Cuadro 25. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con tres bandas.....	76
Cuadro 26. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para intra-banda no contigua con dos sub-bloques.....	77

Cuadro 27. Distribución de espectro para el operador Claro77

Cuadro 28. Distribución de espectro para el operador Movistar79

Cuadro 29. Distribución de espectro para el operador Tigo.....82

Cuadro 30. Anchos de banda máximos alcanzados con Carrier Aggregation en el enlace
ascendente y descendente83

Cuadro 31. Total de asignación actual del espectro en bandas altas y bajas94

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de tráfico y el uso de nuevas tecnologías de telefonía celular, ha hecho necesaria que diversas organizaciones, empresas, fabricantes, entre otros, adelanten estudios acerca de la implementación de nuevas funcionalidades en la red LTE como es el caso de *Carrier Aggregation*, la cual consiste en reutilizar y conseguir un mejor aprovechamiento y explotación del espectro asignado a cada operador de comunicaciones, permitiéndoles sumar varios canales o portadoras que se encuentran fragmentadas para una misma comunicación, lo que hace que el ancho de banda y la velocidad de transmisión se multipliquen con facilidad.

En el presente trabajo se describen los resultados arrojados en el desarrollo del trabajo de grado “ESTUDIO DE *CARRIER AGGREGATION* PARA OPTIMIZAR EL USO DEL ESPECTRO ASIGNADO A LOS OPERADORES MÓVILES EN COLOMBIA” propuesto para optar al título de Especialistas en Telecomunicaciones, el cual consiste en un estudio de *Carrier Aggregation* basado en la normatividad internacional, con el fin de analizar y recomendar a los principales operadores móviles, la posible implementación de esta funcionalidad de acuerdo a la asignación de frecuencias que tienen establecidos actualmente. El estudio se realiza debido a la necesidad de ampliar la capacidad y mejorar la experiencia de navegación del usuario, como solución a la creciente demanda de tráfico por la masificación de los servicios de voz y datos que conlleva a la afectación del desempeño y entrega del servicio.

El estudio se realiza analizando la situación actual de distribución de espectro radioeléctrico que poseen los principales operadores móviles en Colombia con el fin de evaluar en base a la normatividad de la 3GPP (*The 3rd Generation Partnership Project*), organización mundial de comunicaciones inalámbricas que desarrolla estándares o especificaciones en colaboración para arquitecturas de radiocomunicaciones, redes centrales o servicios, la posibilidad de una adopción de la funcionalidad de *Carrier Aggregation* por parte de los operadores de telecomunicaciones.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La masificación de los servicios de comunicaciones, la convergencia de diversos servicios para la transmisión de la información por la misma infraestructura de red y el crecimiento vertiginoso de usuarios ha afectado la capacidad y la calidad de servicio, y aún más ahora que se está planeando la implementación de voz sobre LTE en las redes de telecomunicaciones actuales, se hace necesario realizar un estudio sobre *Carrier Aggregation* (agregación de portadoras) en Colombia como posible funcionalidad en la red, la cual permitiría a los operadores sumar varios canales o portadoras para una misma comunicación lo que hace que el ancho de banda y la velocidad de transmisión se multipliquen con facilidad, obteniendo una mejor capacidad y ofreciendo mayores velocidades que permitan brindar alta calidad de experiencia de navegación del usuario.

¿Cómo podrían los operadores de telecomunicaciones hacer eficiente el uso del espectro asignado en Colombia de acuerdo a los estándares internacionales, para ofrecer una mejor capacidad y mayores velocidades que permitan brindar una alta calidad de experiencia de navegación al usuario y optimizar el desempeño y entrega del servicio.

2. JUSTIFICACIÓN

La evolución de las redes de telecomunicaciones móviles y la variedad de servicios que se ofrecen ha provocado que los fabricantes, proveedores, organismos de regulación, etc., adelanten estudios en conjunto para optimizar y ofrecer mejores servicios en beneficio de los usuarios. Una de las recientes tecnologías que reúne las características anteriores y que se encuentra parcialmente implementada en Colombia es 4G o LTE, la cual ha favorecido la integración de todo tipo de servicios en los distintos escenarios, proporcionando cambios a nivel físico, enlace y estructurales y brindando a los usuarios mayores velocidades de descarga de datos, alto rendimiento y baja latencia.

Sin embargo, con la evolución tecnológica, los usuarios cada vez son más exigentes al querer disfrutar de nuevas experiencias digitales a la mayor velocidad posible, sin interrupciones y percibiendo siempre la mejor calidad y experiencia de servicio. Además, la creciente demanda en el número de usuarios de telefonía móvil tanto en voz como en datos, su consecuente aumento de tráfico, el uso de distintos servicios multimedia como video, juegos en línea, video-llamadas, entre otros y a los estudios que se vienen adelantando en el país por parte de algunos operadores para la implementación, en un futuro no muy lejano, de voz sobre LTE como mecanismo a largo plazo para reemplazar gradualmente las redes tradicionales, han hecho necesaria la implementación de nuevas funcionalidades que permitan hacer más eficiente el uso del espectro y que ayuden a resolver algunas limitaciones en la capacidad, optimizando el desempeño, ofreciendo mayores velocidades de navegación y brindando novedosos servicios multimedia.

Con este proyecto se realiza un estudio de *Carrier Aggregation* en Colombia de acuerdo a los estándares internacionales que existen actualmente, analizando si mediante la asignación de frecuencias que tienen establecidos actualmente los operadores de comunicaciones móviles, es posible adicionar la funcionalidad de *Carrier Aggregation* sobre las redes LTE, la cual permitiría tener una mejor utilización del espectro y hacer uso de los bloques de espectro que se encuentran fragmentados en diferentes bandas de frecuencias, o por el contrario, el gobierno nacional mediante la ANE (Agencia Nacional del Espectro) debe realizar la entrega de nuevas frecuencias o una reorganización del espectro a fin de atribuir anchos de banda más amplios a los operadores de telefonía móvil y de esta forma se puedan fortalecer las llamadas autopistas de información y los servicios móviles de telefonía y banda ancha en el país.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio sobre *Carrier Aggregation* como posible funcionalidad para optimizar el uso del espectro asignado a los operadores de comunicaciones móviles basado en la normatividad internacional.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una investigación sobre la funcionalidad de *Carrier Aggregation* en redes LTE.
- Explicar el concepto de *Carrier Aggregation*, su funcionamiento y los principales elementos que la constituyen.
- Analizar los anchos de banda y la distribución de frecuencias asignadas actualmente a los principales operadores de comunicaciones móviles en Colombia.
- Investigar y analizar la normatividad internacional 3GPP basada en *Carrier Aggregation*.
- Realizar una recomendación a la regulación colombiana de acuerdo a los resultados obtenidos del estudio.
- Realizar una recomendación a los operadores de comunicaciones basados en el estudio realizado.

4. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrolla el marco de referencia que incluye los conceptos, tecnologías y la normatividad internacional de la 3GPP, necesarias en el desarrollo del estudio.

4.1 LONG TERM EVOLUTION

La evolución de los sistemas de comunicaciones de tercera a cuarta generación (4G), así como también el adelanto en materia de desarrollo de aplicaciones móviles, el incremento en el uso del internet, los cambios en las tecnologías móviles, nuevas regulaciones para el uso del espectro radioeléctrico y aspectos del mercado, han traído consigo el desarrollo y despliegue de nuevos servicios para dispositivos móviles, servicios que están ofreciendo amplias capacidades y velocidades que se traducen en mejor calidad y experiencia de navegación del usuario, lo cual permite que se cumplan las exigencias de los usuarios en materia de ofrecer contenidos de video, audio y multimedia online, así como ofrecer servicios nuevos que han ido surgiendo a raíz del desarrollo de las comunicaciones móviles. Adicional, la componente tecnológica a nivel de diseño de interfaz de radio y la capa física son unos de los aspectos llamativos porque son la base para la implementación de una nueva tecnología, pero en realidad el aspecto más importante es el despliegue a nivel de red que lanzan los operadores ya que esta debe brindar flexibilidad, alta potencia y el correcto dimensionamiento de la red con el objetivo de satisfacer la demanda que tiene cada uno de sus usuarios. Con base en lo anterior, es posible decir que “el operador puede expandir la capacidad de la red a través del despliegue de un mayor número de estaciones base, la disponibilidad de mayor cantidad de espectro o el uso de una nueva tecnología más avanzada. La variable preferida a atacar dependerá tanto de la viabilidad y flexibilidad que ofrezcan cada una de ellas”¹.

La tecnología LTE “*Long Term Evolution*”, ha sido desarrollada como una evolución de los sistemas de tercera generación UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) / HSPA (*High-Speed Packet Access*) y es concebida como una red todo-IP en la que desaparece el dominio de conmutación de circuitos, en la que se basan los servicios de voz de tecnologías de segunda y tercera generación, para ofrecer los mismos y novedosos servicios haciendo uso del dominio de conmutación de paquetes PS (*Packet Switching*). LTE se puede considerar el primer escalón en la trayectoria evolutiva que permitirá culminar finalmente en el *LTE-Advanced*.

Según, Ramón², LTE se define en el *release 8 y 9* de la 3GPP (*The 3rd Generation Partnership Project*), la cual es una organización mundial de comunicaciones inalámbricas que desarrolla

¹ COMES, Ramón A. y ÁLVAREZ, Francisco B. LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES. Fundación Vodafone España: España, 2010. ISBN: 84-934740-4-5

² RAMÓN, Agustí; ÁLVAREZ, Francisco; CASADEVALL, Fernando; FERRUS, Ramón; PÉREZ, Jordi y SALLENT, Oriol. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. España: Fundación Vodafone España. 2010. p. 46

estándares o especificaciones en colaboración para arquitecturas de radiocomunicaciones, redes centrales y servicios. Los documentos del 3GPP se estructuran en *release*, cada una de ellas caracterizada por la incorporación de un conjunto de funcionalidades destacadas en relación a la versión anterior. Así, la que se llamó R99 (por el hecho de que se congeló en diciembre de 1999) supuso el primer conjunto de especificaciones UMTS. Seguidamente, tras la llamada R4, se completó en marzo de 2002 la versión R5 que incluye por ejemplo HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*). Tres años después se incorpora HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*) así como MBMS (*Multimedia Broadcast and Multicast Service*) en R6. En la R7 (septiembre de 2007) se incluye HSPA+ (*Evolved HSPA*), mientras que LTE/SAE se asocian ya a R8 y posteriores.

Con la puesta en marcha de la tecnología LTE se vieron varios cambios en los sistemas de comunicaciones que se tenían antes, resaltando dos aspectos importantes con el ingreso de esta tecnología como es la inclusión de todos los servicios (voz, datos, multimedia, etc.), que pueden llegar a soportarse con el protocolo IP (*Internet Protocol*) y las velocidades que se pueden alcanzar con la interfaz de radio de 100Mb/s y 1 Gb/s. De igual manera, con la implementación de esta tecnología se espera romper con las barreras de movilidad que se tienen actualmente.

Entre los requerimientos y especificaciones para el desarrollo de LTE se destacan los siguientes³:

- Ofrecer velocidades de transmisión de datos de hasta 100 Mbps en *downlink* y 50 Mbps en *uplink*.
- Mejora de la eficiencia espectral de tres o cuatro veces por encima de las del *release* 6 (WCDMA) en *downlink* y dos o tres veces más en *uplink*. Con 20 MHz de ancho de banda, la eficiencia espectral requerida es de 5 bits/s/Hz en *downlink* y 2.5 bits/s/Hz en *uplink*.
- El rendimiento (*throughput*) medio por usuario y MHz en el enlace descendente debe ser entre 3 y 4 veces superior al del *release* 6 y de 2 a 3 veces mejor que en *release* 6 en el enlace ascendente.
- Mejoras en la latencia para ofrecer óptima calidad en servicios de voz y juegos online. La latencia en el plano de usuario se refiere al tiempo de transito unidireccional de un paquete desde que está disponible en la capa IP en el terminal y la disponibilidad de este paquete en la capa IP de un nodo en la red de acceso radio, o viceversa, será inferior a 5 ms.
- Mejoras en la cobertura y movilidad.
- Deben soportarse anchos de banda escalables de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz para mayor flexibilidad.
- En cuanto a la asignación del espectro, se debe garantizar posibilidad de uso de banda pareada (modo FDD) y banda no pareada (TDD).

³ CARDONA, Narcis; OLMOS, Juan; GARCÍA, Mario y MONSERRAT, José. 3GPP LTE: Hacia la 4G móvil. 1 ed. Barcelona: Marcombo Universitaria. 2001. p. 25

- Se debe garantizar la interconexión con los sistemas actuales 3GPP (familia de sistemas conformada por GSM, UMTS y LTE) y otros sistemas no-3GPP.

Con el fin de ofrecer y cumplir con estos requisitos, LTE se basa en un nuevo esquema de acceso múltiple en la interfaz de aire: *Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)*, en el enlace descendente o *downlink* (DL) y *Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)*, en el enlace ascendente o *uplink* (UL). Adicional, la incorporación de nuevos esquemas de antenas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), es una parte esencial de las mejoras que LTE aporta a los estándares del 3GPP⁴.

Para *LTE-Advanced*⁵, la 3GPP ha sido la entidad encargada de desarrollar algunas de las capacidades que se deben tener en cuenta:

- Ancho de banda más amplio y soporte para un máximo de 100MHz a través de la agregación de bloques de 20 MHz (agregación de portadora – *Carrier Aggregation*).
- Enlace ascendente con antenas MIMO (dos antenas de transmisión en el dispositivo).
- Enlace descendente MIMO de hasta 8 por 8.
- Coordinado de transmisión multipunto (*COMP*), con dos enfoques propuestos: programación coordinada y/o formación estructurada, y conjuntos de procesamiento/transmisión.

4.1.1 Arquitectura general del sistema LTE. La arquitectura en LTE está compuesta por tres componentes importantes para que la red funcione adecuadamente como son: el terminal móvil (UE – *User Equipment*), la red de acceso y la red troncal. Para poder establecer la conexión entre todos los componentes se necesita que el UE utilice la interfaz de radio que le permite conectarse a la red de acceso, la cual necesita de unas interfaces AN – CN (*Access Network – Core Network*) que le permiten interconectar la red de acceso con la red *core* o red troncal. La arquitectura de red en LTE está basada en las arquitecturas de GSM y UMTS y de ahí su nombre *Evolved Packet Core* (EPC). A diferencia de las otras redes, LTE no soporta conmutación de circuitos, en la que se basan los servicios de voz, pues está diseñada para soportar solo conmutación de paquetes. Con el fin de minimizar el número de nodos, el núcleo de red también posee un único nodo que engloba dos entidades funcionales, la entidad de control de movilidad o *Mobility Management Entity* (MME) y el *Serving-Gateway* (S-GW), más un nodo de enrutamiento a redes externas conocido como *Packet Data Network Gateway* (PDN-GW)⁶. La red se compone de la red de

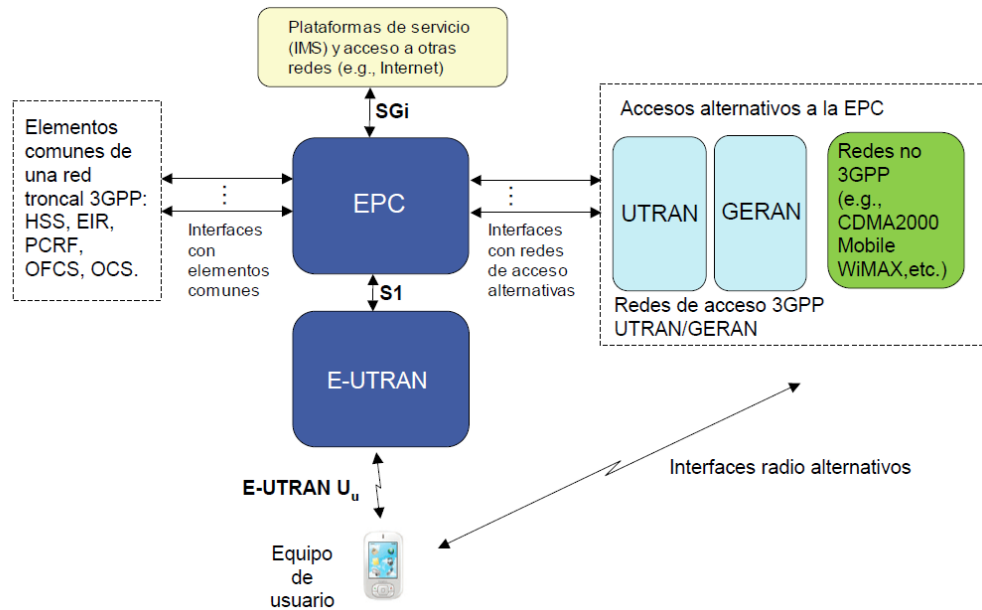
⁴ Ibid., p. 25

⁵ NÚÑEZ CORAL, Jimmy Alexander. Diseño de una red de nueva generación LTE-A para una zona urbana en Bogotá bajo el estándar 3gpp y la recomendación ITU-R M.1457. Tesis de grado Magister en Ingeniería - Telecomunicaciones. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Departamento de Sistemas e Industrial, 2013. 15 p.

⁶ CARDONA, Narcis; OLMOS, Juan; GARCÍA, Mario y MONSERRAT, José. Op. Cit., p. 25

acceso conocida como E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) y EPC (*Evolved Packet Core*), tal como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Arquitectura de red en LTE



Fuente: RAMÓN, Agustí; ÁLVAREZ, Francisco; CASADEVALL, Fernando; FERRUS, Ramón; PÉREZ, Jordi y SALLENT, Oriol. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles.

4.1.1.1 User Equipment y Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network. Respecto a la red de acceso, 3GPP ha especificado tres tipos de redes de acceso diferentes: GERAN (*GSM/EDGE Radio Access Network*), UTRAN (*UMTS Terrestrial Radio Access Network*) y E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*). Las redes de acceso GERAN y UTRAN forman parte del sistema 3G UMTS, mientras que E-UTRAN es la nueva red de acceso del sistema LTE. Cada red de acceso define su propia interfaz radio para la comunicación con los equipos de usuario: GERAN, también denominada de forma habitual simplemente como GSM, utiliza un acceso basado en TDMA (*Time Division Multiple Access*), la tecnología utilizada en UTRAN es WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) y E-UTRAN ha apostado por la tecnología OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*)⁷.

- **Evolved Node B (eNodeBs):** E-UTRAN se compone de estaciones base LTE denominadas *eNodeBs*, los cuales son los responsables de la gestión y asignación de recursos de radio, control de la movilidad, programación de recursos para los enlaces ascendente y descendente, cifrado de la transmisión de datos y de la conectividad con EPC. El *eNodeB* proporciona la conectividad entre los equipos de usuario UE y la red troncal EPC. Las conexiones entre el *eNodeB* y EPC están basadas en IP.

⁷ SERRA, Carlos; MARANTE, Francisco. Arquitectura general del sistema LTE. En: Revista digital de las tecnologías de la información y las comunicaciones. Agosto 2013. Vol 12. No 2. p. 83.

- **User Equipment (UE):** para que el usuario pueda conectarse a la red de acceso denominada E-UTRAN, debe contar con un equipo terminal de datos denominado UE (*User Equipment*), para el establecimiento de la comunicación. Normalmente se trata de teléfonos móviles, tablets, portátil, modem USB, entre otros equipos. El equipo de usuario UE se compone de dos elementos básicos: el propio dispositivo móvil y una tarjeta UICC (*Universal Integrated Circuit Card*), también denominada SIM (*Subscriber Identity Module*) en sistemas GSM y USIM (*Universal SIM*) en UMTS y LTE. Esta tarjeta es la encargada de almacenar la información y sustentar los procedimientos que tienen que ver con la suscripción del usuario a los servicios que provee la red.

4.1.1.2 Evolved Packet Core. El dominio EPC (*Evolved Packet Core*), denominado también como red troncal, ha sido concebido para soportar el acceso al servicio de conectividad IP desde las otras redes de acceso 3GPP (GERAN y UTRAN) así como desde redes no 3GPP (CDMA2000 – *Code Division Multiple Access*, *Mobile Wimax – Worldwide Interoperability for Microwave Access*, etc)⁸. Este dominio consiste de los siguientes elementos:

- **MME (Mobility Management Entity):** este elemento obtiene datos del suscriptor a través de la información almacenada en el HSS (*Home Subscriber Server*). El MME controla y gestiona la señalización entre el UE y EPC incluyendo la autenticación, autorización, control de seguridad, el establecimiento de conexión entre el UE y la red, la itinerancia o *roaming* y los procedimientos relacionados con la gestión de la ubicación del usuario.
- **S-GW (Serving-Gateway):** este elemento de red proporciona funciones de *gateway* o pasarela para la red EPC y brinda interfaces a la E-UTRAN. Transfiere todos los paquetes IP de todos los usuarios en una red. Sirve de punto de anclaje de movilidad local para el *handover* entre eNodeBs. Adicional realiza transferencia y encaminamiento de paquetes del tráfico de usuario tanto en bajada como en subida.
- **PDN-GW (Packet Data Network Gateway):** es el responsable de las acciones relacionadas con la calidad del servicio. Se encarga de conectar los terminales móviles con la red externa. Entre sus funciones se encuentra la asignación de direcciones IP's a los terminales de usuario, el enrutamiento de paquetes de datos hacia y desde las redes externas, filtrado de paquetes de usuarios, aplica QoS para garantizar tasas requeridas de bits o de nivel de servicio tanto en el enlace descendente como en el ascendente.
- **HSS (Home Subscriber Server):** este elemento contiene la base de datos maestra donde se almacena la información de los abonados de la red. Almacena información como la identificación del usuario, información de control de acceso, datos para su autenticación, la localización del usuario, perfil de servicios a los que se encuentra suscrito el usuario, además de la información específica de los servicios. El HSS almacena la información del MME y del PDN-GW sobre el cual cada usuario se encuentra conectado.

⁸ Ibid., p. 83.

- **PCRF (Policy Control and Charging Rules Function):** este elemento de red define las reglas para el cobro y el control de políticas. Se utiliza para controlar los servicios portadores que ofrece la red LTE así como realizar el control de mecanismos de tarificación (por ejemplo tarificación online, offline, medición de volumen de datos transferido, tiempo transcurrido, etc.).

4.1.2 Nivel físico. El principio básico en la capa física de LTE es que los recursos de radios sean compartidos entre los usuarios. Ningún usuario recibe recursos dedicados. Existe una variedad de técnicas para que varios usuarios accedan simultáneamente al sistema de radio. En LTE se utilizan las técnicas de acceso múltiple OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) la cual está basada en el acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal para el enlace descendente y SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) para el acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única en el enlace ascendente.

4.1.2.1 Orthogonal Frequency-Division Multiple Access. El método de acceso múltiple OFDMA (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) se basa en OFDM. OFDM es una transmisión de múltiples portadoras combinando TDMA (acceso múltiple por división de tiempo - *Time Division Multiple Access*) y FDMA (acceso múltiple por división de frecuencia - *Frequency Division Multiple Access*). En FDMA el acceso al medio se realiza dividiendo el espectro disponible en canales, correspondientes a diferentes rangos de frecuencias, realizando la respectiva asignación de estos canales a los distintos usuarios sin presentarse interferencias entre sí. En TDMA se utiliza un canal común o portadora para asignación de recursos de radio a cada usuario en una ranura de tiempo diferente. Haciendo uso de TDMA y FDMA el ancho de banda total se divide en subportadoras espaciadas relativamente densas. Para permitir esta separación, se debe garantizar el espectro de las subportadoras ortogonales. Esto significa, que la banda de frecuencias superior de una subportadora se superpone con la banda inferior de otras subportadoras. Como resultado, todos los recursos radio disponibles se dividen en tiempo y frecuencia y pueden ser compartidos por varios usuarios. Un intervalo de tiempo en una subportadora representa un símbolo OFDM. Cada símbolo contiene datos modulados y la modulación puede ser diferente para cada símbolo⁹.

4.1.2.2 Single Carrier Frequency Division Multiple Access. En el enlace ascendente, se utiliza el acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única SC-FDMA (*Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) en lugar de OFDMA con el fin de reducir la relación entre la potencia máxima y la potencia media (PARP, *Peak to Average Power Ratio*), la cual se presenta como debilidad de OFDMA debido a que hay diferencias significativas en la potencia asignada a cada subportadora ya que los datos de usuario se modulan de forma independiente sobre subportadoras individuales, asignando diferentes valores de potencia entre una subportadora y otra, lo cual conduce a valores altos en la relación PARP y que repercute negativamente en el consumo de energía del terminal de usuario UE. Según, explica Becvar¹⁰, en SC-FDMA, todos los datos transmitidos en el mismo intervalo de tiempo son modulados como una combinación lineal

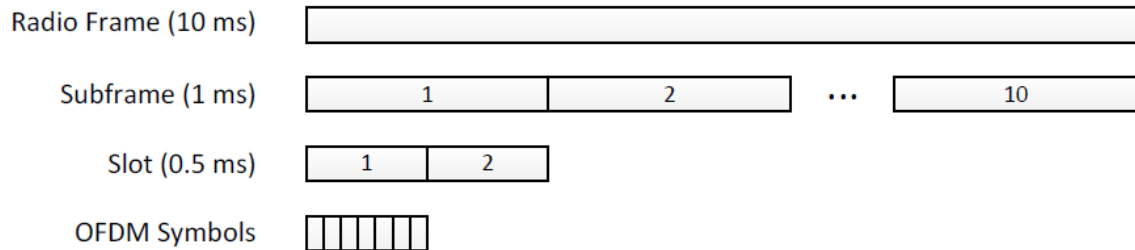
⁹ BECVAR, Zdenek; MACH, Pavel y PRAVDA, Iván. Redes Móviles. 1 ed. República Checa: Improvet. 68-69 p. ISBN 978-80-01-05307-2.

¹⁰ Ibid., p. 63.

de estos símbolos de datos. Por lo tanto, un símbolo en una subportadora contiene componentes relacionados con la información mapeadas en otras subportadoras, de tal forma que se reduce el PAPR, se minimiza la interferencia y el consumo de batería del UE.

4.1.3 Estructura de la trama. Al igual que UMTS, LTE soporta FDD (multiplexación por división de frecuencia - *Frequency Division Duplex*) y TDD (multiplexación por división de tiempo - *Time Division Duplex*) para la transmisión de datos. FDD es un modo de funcionamiento de las redes LTE en el que se emplean dos frecuencias para conexión a la red: una frecuencia en el enlace descendente (red-terminal) y otra en el ascendente (terminal-red). Para el caso de TDD las comunicaciones en el enlace descendente y ascendente se realizan en la misma banda de frecuencia pero a intervalos de tiempo diferentes. Según Antti¹¹, en FDD, la estructura de la trama y subtrama son iguales tanto en el enlace descendente como en el ascendente, mientras que la estructura de la ranura depende del método de acceso múltiple y por lo tanto es diferente en cada caso (enlace descendente y ascendente). La ranura en el enlace descendente incluye 7 símbolos OFDM. En el enlace ascendente, el número de símbolos depende del ancho de banda utilizado. La transmisión se organiza en tramas con una duración de 10 ms (milisegundos) y cada una de estas se divide en 10 subtramas. En la Figura 2 se muestra la estructura de la trama.

Figura 2. Estructura de la trama en LTE (downlink)



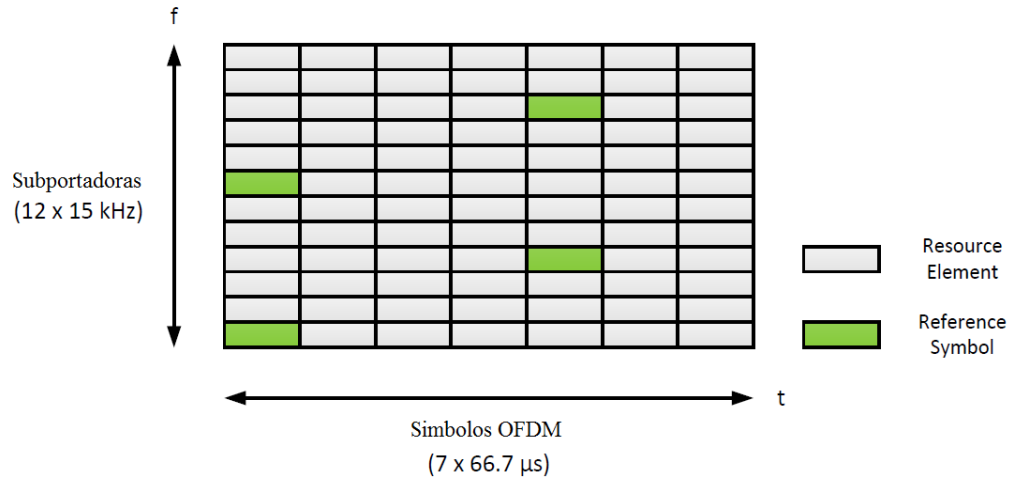
Fuente: REINIKAINEN, Antti. Performance evaluation of LTE-Advanced Carrier Aggregation.

Cada subtrama consta de dos ranuras temporales de igual duración, de 0.5 ms cada una, denominados bloques de recursos físicos (PRB - *Physical Resource Block*) y este contiene 12 subportadoras. El espaciamiento entre las subportadoras es de 15 kHz, por lo cual el ancho de banda total del PRB es de 180 kHz. El bloque de recursos se muestra en la Figura 3. El *eNodeB* realiza asignación de recursos de radio en cada subtrama (1ms), el cual es conocido como intervalo de tiempo de transmisión (TTI - *Transmission Time Interval*). Por lo cual, la asignación mínima para cada usuario es de 2 PRBs y este número de bloques de recursos dependerá en gran medida del ancho de banda disponible. Los anchos de banda soportados en LTE son 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz. El ancho de banda de 1.4 MHz se traduce a 6 PRBs en

¹¹ REINIKAINEN, Antti. Performance evaluation of LTE-Advanced Carrier Aggregation. Trabajo de grado Máster en Ciencias de la Tecnología. Espoo: School of Electrical Engineering. Communications Engineering. 2015. p.9-10.

donde se incluyen las bandas de guarda. Para el caso del máximo ancho de banda en LTE el cual corresponde a 20 MHz, se cuenta con 100 PRBs y las bandas de guarda.

Figura 3. Estructura del bloque de recursos



Fuente: REINIKAINEN, Antti. Performance evaluation of LTE-Advanced Carrier Aggregation.

En la trama FDD, se consideran las diferentes frecuencias para cada dirección, por lo cual se pueden utilizar las 10 subtramas para la transmisión simultánea en el enlace ascendente y descendente, lo cual conduce a la distribución equitativa de recursos de radio en ambos sentidos si se utiliza el mismo ancho de banda.

4.1.4 Modulación. La modulación es el proceso mediante el cual las propiedades de la señal portadora son modificadas en función de la señal modulante, la cual contiene la información a ser transmitida. La modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (*Quadrature Phase Shift Keying* - QPSK) y la modulación de amplitud en cuadratura (*Quadrature Amplitude Modulation* - QAM) son los tipos de modulación digital utilizados en LTE para transmitir información en el plano de usuario. En QPSK, como menciona Wayne¹², son posibles cuatro fases de salida para una sola frecuencia de portadora. Como hay cuatro fases distintas de salida, debe haber cuatro condiciones de entrada diferentes. Debido a que la entrada digital a un modulador QPSK es una señal binaria, para producir cuatro condiciones distintas de entrada se necesita más de un solo bit de entrada, en consecuencia, los datos binarios de entrada se combinan en grupos de dos bits, llamados dibits, en razón a que con dos bits hay cuatro condiciones posibles. Cada dibit de código genera una de las cuatro fases posibles de salida.

En QAM, la señal de amplitud y fase determinan el estado, logrando tener 16 o 64 estados diferentes. Los esquemas de modulación 16QAM y 64QAM en donde se pueden transmitir 4 bits y 6 bits por símbolo respectivamente, son los que se utilizan para transmisión de información en LTE. La cantidad de bits por símbolo a ser transmitidos, viene definido por el parámetro de la

¹² TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4 ed. México: Pearson Educación. 2003. 484 p. ISBN 970-26-0316-1

eficiencia espectral, el cual define el número de bits por segundo que se puede transmitir por cada Hertzio, siendo 64QAM quien ofrece mejor eficiencia espectral.

De acuerdo a la Figura 3, y según el análisis de Agustí¹³, en un bloque de recursos físicos PRB se dispone de 7 símbolos con 12 subportadoras asociadas a cada uno de ellos, obteniendo un total de 84 bloques de recursos disponibles en donde ubicar los símbolos QPSK, 16QAM o 64QAM. Si se utiliza la modulación de mayor eficiencia espectral, es decir la 64QAM, la cual transmite 6 bits/símbolo, se obtiene que en un solo PRB se pueden llegar a transmitir hasta 504 bits, en donde se incluyen datos codificados de usuario, canales de control y señalización, cada 0.5 ms, lo que proporciona una velocidad bruta de transmisión pico de aproximadamente:

$$R_{PRB} = \frac{504 \text{ bits}}{0.5 \text{ ms}} \cong 1 \text{ Mbps}$$

Por consiguiente, tomando en consideración el número de radio bloques de cada uno de los anchos de banda soportados en LTE, las velocidades de pico globales en la interfaz aire para las distintas canalizaciones son las que se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Velocidades pico posibles en función de la canalización para 64QAM

Canalización	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Numero de PRBs	6	15	25	50	75	100
Velocidad Pico Total (Mbps)	$\cong 6$	$\cong 15$	$\cong 25$	$\cong 50$	$\cong 75$	$\cong 100$
Velocidad pico bruta de usuario (Mbps)*	$\cong 5.1$	$\cong 12.8$	$\cong 21$	$\cong 42.5$	$\cong 63.7$	$\cong 85$
*Se destina el 15% de los recursos a control y señalización.						

Fuente: RAMÓN, Agustí; ÁLVAREZ, Francisco; CASADEVALL, Fernando; FERRUS, Ramón; PÉREZ, Jordi y SALLENT, Oriol. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles.

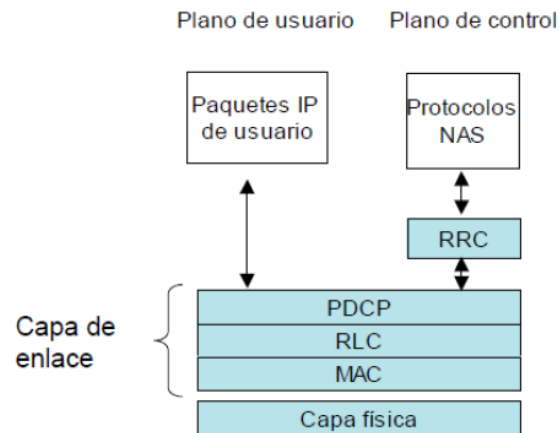
4.1.5 Protocolos de radio. Las torres de protocolos utilizadas en las tres interfaces de E-UTRAN (radio, S1 y X2) se estructuran en torno a un plano de usuario y un plano de control. El plano de usuario abarca los protocolos utilizados para el envío de paquetes IP correspondiente a los servicios a los que acceden los terminales a través de la red. El plano de control se refiere a los protocolos necesarios para sustentar las funciones y procedimientos de las diferentes interfaces.

4.1.5.1 Protocolos en la interfaz de radio. La interfaz de radio utiliza una torre de protocolos para la transmisión de información entre el eNB y el equipo de usuario, la cual está conformada por una capa de enlace y una capa física, tal como se muestra en la Figura 4. La capa de enlace está conformada en tres subcapas: *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP), *Radio Link Control* (RLC) y *Medium Access Control* (MAC). Cada capa/subcapa de la torre de protocolos se ocupa de un conjunto de funciones y define el formato de los paquetes de datos (cabeceras y colas) que se

¹³ RAMÓN, Agustí; ÁLVAREZ, Francisco; CASADEVALL, Fernando; FERRUS, Ramón; PÉREZ, Jordi y SALLENT, Oriol. Op. Cit., p 253.

intercambian entre entidades remotas¹⁴. A continuación se describen las principales características de las diferentes capas/subcapas:

Figura 4. Protocolos de la interfaz de radio E-Utran



Fuente: RAMÓN, Agustí; ÁLVAREZ, Francisco; CASADEVALL, Fernando; FERRUS, Ramón; PÉREZ, Jordi y SALLENT, Oriol. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles.

- **Packet Data Convergence Protocol (PDCP):** las funciones principales de esta capa son la compresión de cabeceras de los paquetes IP y el cifrado de la información para garantizar su confidencialidad e integridad. La cabecera añadida por esta capa, básicamente contiene un número de secuencia que identifica el paquete IP enviado y permite realizar una entrega ordenada de los paquetes IP así como detectar posibles duplicados de los paquetes IP.
- **Radio Link Control (RLC):** esta capa permite enviar de forma fiable los paquetes PDCP entre el eNB y el equipo de usuario. Para ello, la capa RLC soporta funciones de corrección de errores mediante mecanismos *Automatic Repeat Request* (ARQ), concatenación, segmentación y reensamblado, entrega ordenada de paquetes PDCP a capas superiores, detección de duplicados y detección/recuperación de errores en el protocolo.
- **Medium Access Control (MAC):** es la capa encargada de controlar el acceso al canal radio. Para ello, la capa MAC soporta funciones de *scheduling* dinámico entre equipos de usuario atendiendo a prioridades, multiplexa los paquetes RLC de diferentes servicios portadores radio en los canales de transporte ofrecidos por la capa física (un canal de transporte puede ser compartido por varios servicios portadores de uno o varios equipos de usuario) y realiza un control de errores mediante *Hybrid ARQ* (HARQ). Los servicios de transferencia que la capa MAC ofrece a la capa RLC se denominan canales lógicos.
- **Capa física:** es la capa encargada de realizar la transmisión propiamente dicha a través del canal radio. Alberga funciones de codificación de canal, modulación, procesamiento asociado a las

¹⁴ Ibid., p 71.

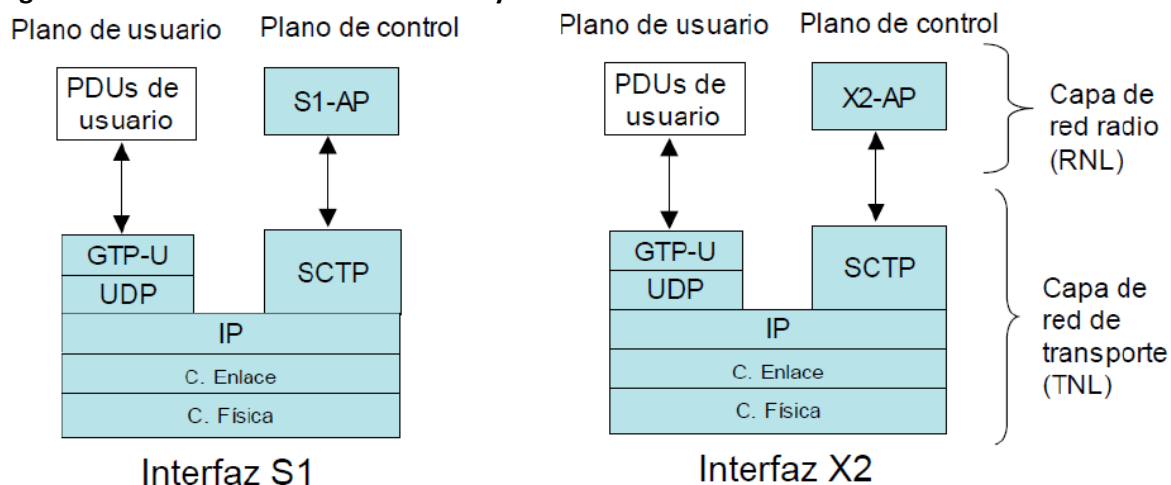
técnicas de múltiples antenas de transmisión/recepción, y mapeo de la señal a los recursos físicos apropiados de frecuencia-tiempo. En el enlace ascendente, la capa física se basa en un esquema SC-FDMA. En el enlace descendente, el esquema de transmisión es OFDMA. Los servicios de transferencia que la capa física ofrece a la capa MAC se denominan canales de transporte.

Respecto al plano de control entre el equipo de usuario y la red, este se soporta sobre la misma capa de enlace (protocolos PDCP, RLC, MAC) y la misma capa física utilizadas en el plano de usuario. Los protocolos de nivel de red específicos de este plano son:

- **Radio Resource Control (RRC):** esta capa permite establecer una conexión de control entre el eNB y un equipo de usuario a través de la cual se llevan a cabo un número importante de funciones relacionadas con la gestión de la operatividad de la interfaz radio. Entre dichas funciones de la capa RRC destacan los mecanismos de gestión de los servicios portadores radio (señalización para el establecimiento/liberación/modificación de los portadores radio), el soporte de funciones de movilidad (señalización de *handover*), la difusión (*broadcast*), entre otros.
- **Señalización de los protocolos NAS:** los protocolos NAS se extienden entre la entidad de red MME en la red troncal y el equipo de usuario. Los mensajes de estos protocolos se transportan de forma transparente en la interfaz radio encapsulados dentro de la parte de datos de los mensajes RRC. Las principales funciones de los protocolos NAS son: autenticación, autorización, gestión de movilidad de los terminales que no tienen una conexión RRC establecida y gestión de los servicios portadores de la red EPS.

4.1.5.2 Protocolos en las interfaces S1 y X2. La estructura de protocolos utilizada en E-UTRAN para soportar las interfaces S1 y X2 establece una separación entre la capa de red radio (*Radio Network Layer*, RNL) y la capa de red de transporte (*Transport Network Layer*, TNL). Esta descomposición tiene como objetivo aislar las funciones que son específicas del sistema de comunicaciones móviles (UMTS o LTE), de aquellas otras que dependen de la tecnología de transporte utilizada, por ejemplo IP o ATM. De esta forma, los protocolos específicos de la red de acceso radio constituyen la capa RNL mientras que la capa TNL alberga los protocolos utilizados para el transporte de la información de la capa RNL entre las entidades de la red. En la Figura 5 se ilustra la arquitectura de protocolos de las interfaces S1 y X2. Los documentos base del 3GPP que especifican la estructura de las interfaces S1 y X2 son respectivamente, 3GPP TS36.410 y TS 36.420.

Figura 5. Protocolos en las interfaces S1 y X2



Fuente: RAMÓN, Agustí; ÁLVAREZ, Francisco; CASADEVALL, Fernando; FERRUS, Ramón; PÉREZ, Jordi y SALIENT, Oriol. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles.

4.1.6 Bandas de operación en LTE. La red de acceso E-Utran está diseñada, según la normatividad de la 3GPP, para operar en las bandas de frecuencias definidas en el Cuadro 2. En este cuadro se relaciona el número de la banda de operación según la numeración realizada por la 3GPP, con su correspondiente rango de frecuencias tanto en el enlace ascendente como descendente y su respectivo modo de multiplexación (FDD o TDD) para la transmisión de datos. Para el caso de FDD, se puede determinar que las bandas están divididas en dos sub-bandas diferentes: una para las comunicaciones de subida (terminal-red) y otra para las comunicaciones de bajada (red-terminal), tal como se observa en las bandas 1 a 32, excepto las bandas restringidas y las reservadas. Para el caso de TDD las comunicaciones se realizan en la misma banda de frecuencia tanto en el enlace descendente como en el ascendente, pero a intervalos de tiempo diferentes, bandas 33 a 44.

Cuadro 2. Bandas de operación en E-Utran

BANDA DE OPERACIÓN	Banda de operación en uplink (BS recibe, UE transmite)	Banda de operación en downlink (BS transmite, UE recibe)	Modo Dúplex
	F(UL_LOW) – F(UL_HIGH)	F(DL_LOW) – F(DL_HIGH)	
1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz – 1755 MHz	2110 MHz – 2155 MHz	FDD
5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
6*	830 MHz – 840 MHz	875 MHz – 885 MHz	FDD
7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz -2690 MHz	FDD
8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz – 1784.9 MHz	1844.9 MHz – 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz – 1770 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 2. Bandas de operación en E-Utran (Continuación)

BANDA DE OPERACIÓN	Banda de operación en uplink (BS recibe, UE transmite)	Banda de operación en downlink (BS transmite, UE recibe)	Modo Dúplex
	F(UL_LOW) – F(UL_HIGH)	F(DL_LOW) – F(DL_HIGH)	
11	1427.9 MHz – 1447.9 MHz	1475.9 MHz – 1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
15	Reservado	Reservado	FDD
16	Reservado	Reservado	FDD
17	704 MHz – 716 MHz	734 MHz – 746 MHz	FDD
18	815 MHz -830 MHz	860 MHz – 875 MHz	FDD
19	830 MHz -845 MHz	875 MHz -890 MHz	FDD
20	832 MHz -862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz – 1462.9 MHz	1495.9 MHz – 1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz – 3490 MHz	3510 MHz – 3590 MHz	FDD
23	2000 MHz – 2020 MHz	2180 MHz – 2200 MHz	FDD
24	1626.5 MHz – 1660.5 MHz	1525 MHz – 1559 MHz	FDD
25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	FDD
26	814 MHz – 849 MHz	859 MHz – 894 MHz	FDD
27	807 MHz – 824 MHz	852 MHz – 869 MHz	FDD
28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
29	N/A	717 MHz – 728 MHz	FDD**
30	2305 MHz – 2315 MHz	2350 MHz – 2360 MHz	FDD
31	452.5 MHz – 457.5 MHz	462.5 MHz – 467.5 MHz	FDD
32	N/A	1452 MHz – 1496 MHz	FDD**
33	1900 MHz 1920 MHz	1900 MHz – 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz – 1910 MHz	1850 MHz – 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz – 1990 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz – 1930 MHz	1910 MHz – 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
41	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
42	3400 MHz – 3600 MHz	3400 MHz – 3600 MHz	TDD
43	3600 MHz – 3800 MHz	3600 MHz – 3800 MHz	TDD
44	703 MHz – 803 MHz	703 MHz – 803 MHz	TDD
*La banda 6 no aplica			
**Bandas restringidas cuando se realiza configuración de Agregación de portadora. La banda de operación en <i>downlink</i> es pareada con la banda de <i>uplink</i> (parte externa).			

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

4.2 EVOLUCIÓN DE CARRIER AGGREGATION

Con la gran oferta que ha tenido el uso de datos de banda ancha móvil de los usuarios que disfrutaban de los servicios de datos de alta calidad a través de computadores, portátiles y teléfonos inteligentes, entre otros equipos, HSPA+ (*Evolved High-Speed Packet Access – H+*) ha tenido una

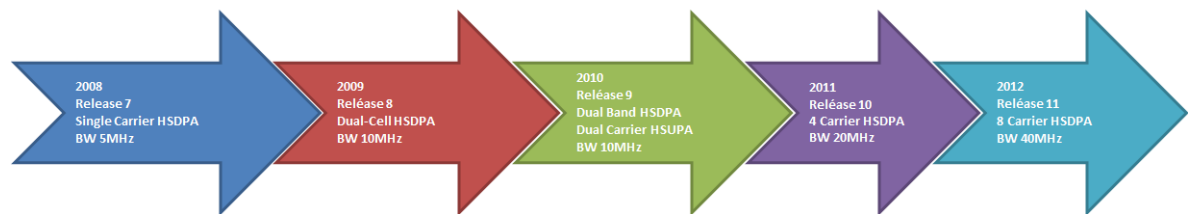
gran acogida, teniendo en cuenta que el volumen de datos es más usado que el servicio de voz en términos de paquetes transferidos.

DC-HSDPA es una funcionalidad que se encuentra limitada a 2 portadoras adyacentes de 5MHz. Se habla de esta funcionalidad a partir del *release* 8 en la 3GPP, teniendo una evolución en el *release* 9 donde se supera la limitación de portadora adyacente, para proporcionar una operación de doble banda HSDPA con bandas de frecuencias separadas por MIMO. En este *release* también se considera el enlace ascendente y es introducido el *Carrier HSPA Dual*.

En el *release* 10, la estandarización de la estructura desarrollada en los *release* anteriores de múltiples portadoras en la 3GPP, se reutiliza para proporcionar 4 portadoras de HSDPA con dos bandas de frecuencia separadas.

Un paso al *release* 11 es proporcionar una agregación de hasta 8 portadoras en HSDPA de hasta 40MHz de uso del espectro, un requerimiento de la ITU para ofrecer un verdadero 4G. Este *release* también trae un soporte de agregación de portadoras no adyacentes en la misma banda de frecuencia. En la Figura 6 se muestra la evolución de la tecnología H+ a lo largo de los últimos años y los anchos de banda soportados por cada una de las tecnologías.

Figura 6. Evolución de Tecnología H+ a LTE



Fuente: Los autores.

Con la evolución de estos *release* se ha aumentado la capacidad en la velocidad pico de manera significativa. *Carrier Aggregation* es una de las pocas funcionalidades que brinda una mejor capacidad y velocidad a nivel de red. En la Figura 7 se muestra la velocidad de datos del enlace descendente teórico (*throughput*), y se evidencia, por ejemplo, para el caso de *downlink*, que con la mejora de cada *release* se van duplicando estos picos de velocidad, pasando de 28 Mbps para el *release* 7, a alcanzar en el *release* 11 entre los 336 Mbps con MIMO 2x2 y los 672 Mbps de *throughput* para MIMO 4x4. De la misma forma sucede en el caso de *uplink*, en el cual para el *release* 7 se contaba con 5.76 Mbps, duplicando la velocidad en cada *release* y alcanzando los 70 Mbps en el *release* 11.

4.2.1 Release 7. La tecnología HSPA+ (HSPA Plus) hace su aparición en el *release* 7 de la 3GPP. Se pueden alcanzar velocidades teóricas hasta de 28 Mbps en el enlace de bajada y en el de subida hasta 11.52 Mbps, esto se da gracias a una técnica de múltiples antenas llamada MIMO (*Multiple*

Input Multiple Output), que consiste en el uso de múltiples antenas tanto para recibir como para enviar información en los enlace de bajada y subida. Desde su introducción, H+ ha permitido hacer frente a la creciente necesidad de mayores capacidades y velocidades de datos, evolucionando a la tecnología 4G, la cual ofrece mejores tasas de transferencias de información, utilizando una interfaz de aire y métodos de transmisión diferentes.

Figura 7. Evolución de throughput en HSPA con Carrier Aggregation para downlink y uplink



Fuente: Los autores.

4.2.2 Release 8. El concepto de múltiples portadoras para HSPA es introducido por primera vez en el *release 8* como *Dual-Cell HSDPA*. Debido a las altas velocidades de datos, al incremento y al despliegue de la cobertura en los distintos operadores, se aplica DC-HSDPA con dos portadoras adyacentes de 5 MHz. Por medio de programación se pueden transmitir ambas portadoras de manera simultánea, permitiendo duplicar la velocidad máxima de una sola portadora HSPA+ de 21 Mbps a 42 Mbps empleando una modulación de 64QAM sin utilizar MIMO. DC-HSDPA puede ser utilizada en cualquiera de las dos portadoras, y cualquiera de las portadoras se puede configurar como celda primaria, lo que beneficia tener una carga eficiente en las portadoras. Los dos bloques de transporte HS-DSCH son procesados de manera independiente, incluyendo retransmisiones.

4.2.3 Release 9. Al ver las necesidades que crecieron por parte del usuario, se ve la insuficiencia que existe en la carga de datos, lo que condujo al desarrollo de una nueva tecnología en la cual se contara con una doble portadora para el enlace ascendente. Es por esta razón, que el proceso de HSUPA con doble portadora en el enlace ascendente con celdas vecinas se nombra desde el *release* 9. El principio de esta tecnología es similar al de DC-HSUPA: duplicar la velocidad del enlace ascendente hasta 23Mbps utilizando una modulación de 16 QAM. Es de aclarar que las condiciones que se tienen en el enlace ascendente a nivel de equipo móvil (UE) se encuentran limitadas por el ancho de banda y no por la potencia real en el enlace ascendente de transmisión.

Con DC-HSUPA es posible la transmisión de dos canales de transporte, uno para cada portadora de enlace ascendente, donde se tiene que el usuario tiene servicio por un mismo nodo B, pero en más de dos celdas diferentes en el mismo sector. La portadora secundaria puede activarse o desactivarse dependiendo del orden que se tenga en la celda. La activación en HSUPA es de manera independiente entre sí, ya que tiene su propia señalización, control de potencia y el *handover* de manera suave entre las mismas.

Una de las limitaciones que se tiene con el uso de DC-HSUPA es que para que este funcione debe ser configurado el DC-HSDPA, debido a que la portadora de enlace ascendente secundaria puede estar activa solo si la portadora del enlace descendente secundaria también está activa. La razón principal para que la opción del enlace descendente secundaria este activa es porque cuenta con canales de operación esenciales (F-DPCH, E-AGCH, E-RGCH, E-HICH)¹⁵, que son necesarios para el correcto funcionamiento de la portadora.

En este *release*, se especifica el funcionamiento de doble banda HSDPA para tres combinaciones de distinta bandas, una para cada región que se tiene en la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones)¹⁶:

- Banda 1 (2100MHz) y Banda 5 (850MHz)
- Banda 1 (2100MHz) y Banda 8 (900MHz)
- Banda 2 (1900MHz) y Banda 4 (2100/1700MHz)

Con los aportes y logros del *release* 9, se permitió agregar más combinaciones de acuerdo a los requerimientos que se generaron a partir de este y se dejaron abiertas las puertas para que en el *release* 10 fuese posible agregar más combinaciones de bandas como las que se muestran a continuación¹⁷:

- Banda 1 (2100MHz) y Banda 11 (1450MHz)

¹⁵ TIWARI, Satish Kumar. Carrier Aggregation in LTE-ADVANCED. Tesis de grado Magister de tecnología de comunicación y redes. India: National Institute of Technology, Rourkela. Department of Electronics & Communication Engineering, 2014. 15 p.

¹⁶ Ibid., p 16.

¹⁷ Ibid., p 16.

- Banda 2 (1900MHz) y Banda 5 (850MHz)

4.2.4 Release 10. Para este *release* se cuenta con el soporte de cuatro portadoras no contiguas para HSDPA. Este se basa en el principio similar al *release* 8 con DC-HSDPA y al *release* 9 en dual banda con MIMO. Las 4 portadoras en HSDPA permiten que en el NodoB o estación de radio, con una sola transmisión de usuario, se pueda tener hasta 4 portadoras con 5 MHz al mismo tiempo.

En este *release* se emplea un esquema de modulación pico de 64QAM y se configura en el enlace descendente el uso de MIMO 2x2 para cada una de las portadoras en este enlace, alcanzando una velocidad de datos máxima teórica de 168Mbps, duplicado el rendimiento alcanzado con (DB) DC-HSDPA¹⁸.

El uso de las 4 portadoras de HSDPA puede ir en dos bandas de frecuencia, con una estructura parecida a la que se utilizó para el *release* 9, teniendo en cuenta las siguientes combinaciones de banda compatibles para cada una de las regiones de acuerdo a la ITU¹⁹:

- **Banda 1 (2100MHz) y Banda 5 (850MHz):** es posible utilizar una o dos portadoras en la banda 1 al mismo tiempo, al igual que en la banda 5.
- **Banda 1 (2100MHz) y Banda 8 (900MHz):** en este caso es posible usar dos o tres portadoras en la banda 1 al mismo tiempo, así como configurar una portadora en la banda 8.
- **Banda 2 (1900MHz) y Banda 4 (2100/1700MHz):** se puede usar una o dos portadoras en la banda 2 al mismo tiempo, así como una o dos portadoras en la banda 4.

4.2.5 Release 11. En el *release* 11, se tiene un gran potencial para *Carrier Aggregation* con HSDPA ya que este se extiende a usar máximo 8 portadoras que emplearán hasta 40 MHz agregados dentro de un terminal móvil (UE). Es de aclarar que no es necesario que la portadora sea adyacente, y es probable que se pueda hacer la agregación en más de una banda de frecuencia.

El rendimiento máximo para este *release* se duplica en comparación con las cuatro portadoras en HSDPA para el *release* 10, y se espera que tenga rendimiento similar en cada una de las características que se tienen para las múltiples portadoras estandarizadas en los *release* 8 al 10. El despliegue de las 8 portadoras para HSDPA está limitado a una sola portadora en el enlace ascendente. De igual manera, MIMO se puede configurar de forma independiente por portadora.

¹⁸ ZHOU, Xiaojin y ZHANG Xinchang. LTE-Advanced air interface technology. Carrier Aggregation. Taylor & Francis Group: New York, 2013. ISBN: 978-1-4665-0152-2.

¹⁹ TIWARI, Op. cit. p 17.

De acuerdo al CQI (*Channel Quality Information*) que maneje el UE, indicador de calidad del canal que reporta el móvil a la base, se tiene una categoría determinada para HSPA, las cuales se definen a partir del *release* 9 con más de 30 categorías en función del número HS-DSCH empleado de manera paralela, del tipo de modulación, si soporta *Dual Carrier* y su compatibilidad con la técnica de MIMO como se muestra en el Cuadro 3²⁰.

Cuadro 3. Categoría de HSPA en los terminales

Release 3GPP	Categoría	Modulación	MIMO, Multi-celda	Velocidad Máxima en datos (Mbit/s)	Máximo número de HS-DSCH
Release 5	1	16-QAM		1,2	5
Release 5	2	16-QAM		1,2	5
Release 5	3	16-QAM		1,8	5
Release 5	4	16-QAM		1,8	5
Release 5	5	16-QAM		3,6	5
Release 5	6	16-QAM		3,6	5
Release 5	7	16-QAM		7,2	10
Release 5	8	16-QAM		7,2	10
Release 5	9	16-QAM		10,1	15
Release 5	10	16-QAM		14,0	15
Release 5	11	QPSK		0,9	5
Release 5	12	QPSK		1,8	5
Release 7	13	64-QAM		17,6	15
Release 7	14	64-QAM		21,1	15
Release 7	15	16-QAM	MIMO 2x2	23,4	15
Release 7	16	16-QAM	MIMO 2x2	28,0	15
Release 7	17	64-QAM		17,6	15
		16-QAM	MIMO 2x2	23,4	15
Release 7	18	64-QAM		21,1	15
		16-QAM	MIMO 2x2	28,0	15
Release 8	19	64-QAM	MIMO 2x2	35,3	15
Release 8	20	64-QAM	MIMO 2x2	42,2	15
Release 8	21	16-QAM	Dual-Cell	23,4	15
Release 8	22	16-QAM	Dual-Cell	28,0	15
Release 8	23	64-QAM	Dual-Cell	35,3	15
Release 8	24	64-QAM	Dual-Cell	42,2	15
Release 9	25	16-QAM	Dual-Cell+MIMO 2x2	46,7	15
Release 9	26	16-QAM	Dual-Cell+MIMO 2x2	55,9	15
Release 9	27	64-QAM	Dual-Cell+MIMO 2x2	70,6	15
Release 9	28	64-QAM	Dual-Cell+MIMO 2x2	84,4	15
Release 10	29	64-QAM	Triple-Cell	63,3	15

Fuente: Ministerio de Industria, energía y turismo de España.

²⁰ MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. Estudio de requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE. España: Top Optimized Technologies. p 7-8.

Cuadro 3. Categoría de HSPA en los terminales (Continuación)

Release 3GPP	Categoría	Modulación	MIMO, Multi-celda	Velocidad Máxima en datos (Mbit/s)	Máximo número de HS-DSCH
Release 10	30	64-QAM	Triple-Cell+MIMO 2x2	126,6	15
Release 10	31	64-QAM	Quad-Cell	84,4	15
Release 10	32	64-QAM	Quad-Cell+MIMO 2x2	168,8	15
Release 11	33	64-QAM	Hexa-Cell	126,6	15
Release 11	34	64-QAM	Hexa-Cell+ MIMO 2x2	253,2	15
Release 11	35	64-QAM	Octa-Cell	168,8	15
Release 11	36	64-QAM	Octa-Cell+ MIMO 2x2	337,5	15
Release 11	37	64-QAM	Dual-Cell+ MIMO 4x4	168,8	15
Release 11	38	64-QAM	Quad-Cell+ MIMO 4x4	337,5	15

Fuente: Ministerio de Industria, energía y turismo de España.

4.2.6 Release 12. Esta versión fue publicada en marzo de 2014 y contiene una amplia gama de características tanto para LTE como HSPA+, lo cual trae una mayor eficiencia en las redes y dispositivos, así como también habilita la prestación de nuevos servicios de telecomunicaciones. El principal objetivo del *release 12* es proveer a los operadores móviles de nuevas funcionalidades para incrementar la capacidad, extendiendo el ahorro de energía en los terminales móviles, reduciendo el consumo de energía de los equipos a nivel de red, maximizando la eficiencia y soportando diferentes tipos de tráfico con el fin de ofrecer a los usuarios confiabilidad, calidad y rapidez en la experiencia de navegación.

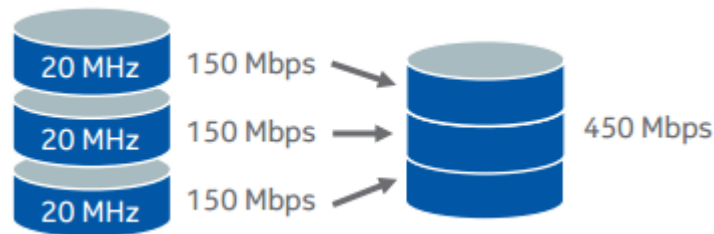
De acuerdo al resumen ejecutivo publicado por 4G Américas²¹, el *release 12* habilita nuevas funcionalidades y proporciona las siguientes mejoras:

- La funcionalidad de *Carrier Aggregation* permite un máximo de tres portadoras en *downlink*.
- Movilidad en redes heterogéneas y celdas LTE pequeñas (*Small Cell*).
- Servicios de proximidad LTE: los terminales móviles que se encuentren cerca se comunican directamente entre si en lugar de realizarlo a través de la red celular, con el fin de utilizarlo en caso de desastres para comunicación con el personal de la seguridad pública cuando una red no se encuentra disponible.

²¹ 4G AMÉRICAS. Understanding 3GPP release 12: Standards for HSPA+ and LTE enhancements. Resumen ejecutivo. [En línea]. 2015. [13-Enero-2016]. Disponible en: http://www.4gamericas.org/files/6614/2359/0457/4G_Americas_-_3GPP_Release_12_Executive_Summary_-_February_2015.pdf

- Mejoras en los terminales de usuario UE.
- Procedimientos de LTE para soportar diversos tipos de tráfico.
- Se definen nuevas características y mejoras para el sistema de antenas MIMO en el enlace de descarga.
- *Carrier Aggregation* incluye bandas de frecuencia en FDD y TDD, así como también el soporte para agregación de dos componentes de *carrier* en *uplink* y tres en *downlink*. La versión soporta CA con tres portadoras en *downlink*, con hasta 20 MHz de espectro por cada portadora, resultando en un ancho de banda total de 60 MHz de espectro, lo cual se traducirá en velocidades de hasta 450 Mbps, tal como se ilustra en la Figura 8.

Figura 8. Agregación de 3 portadoras en downlink con Carrier Aggregation



Fuente: NOKIA. LTE release 12 and beyond.

En *Carrier Aggregation*, el *release 12* ha especificado que los terminales móviles UE soporten los modos TDD y FDD de manera conjunta. CA entre los modos FDD y TDD permitirían mayores tasas de *throughput* a los usuarios, para ser impulsado al menos en el enlace descendente y brindaría una mejor manera de dividir la carga de tráfico en la red entre el espectro de FDD y TDD. Adicional, CA soporta el funcionamiento dual de conectividad entre TDD y FDD. La razón para operar en este modo, es para mejorar el *throughput* de los usuarios, disminuir la señalización del núcleo (*core*) de red o para mejoras en el rendimiento de la movilidad.

El *release 12*, adiciona 5 nuevas bandas de frecuencias con las cuales se abren nuevos esquemas y mejoras para la funcionalidad de *Carrier Aggregation*. Cada vez son más las nuevas combinaciones que surgen con la publicación de un nuevo *release*. En el año 2012 solo había 21 combinaciones en CA. En el 2013, ya había 13 combinaciones en CA intra-banda y 50 en inter-banda. La presencia adicional de combinaciones de una sola portadora en *uplink* con tres en *downlink*, refleja el abrumador incremento de tráfico actual en *downlink* y la necesidad de adicionar capacidad en el enlace descendente para servir esta demanda.

4.2.7 Release 13. Para este *release*, actualmente se están adelantando estudios y debates por parte del organismo que define los estándares de telefonía móvil, 3GPP, en el que se incluyen

optimizaciones a HSPA+ y a LTE *Advanced*. Esta última versión, llega justo cuando la industria de la telefonía móvil comienza la discusión y el desarrollo de una nueva tecnología, la generación 5G, con el fin de hacer frente al crecimiento de tráfico en medio de la escasez de espectro, el internet de las cosas y una transformación de red que creará un entorno totalmente IP. Los principales ejes que se estudiarán y contemplarán, según 4G Américas²² en este *release* serán:

- Sistemas activos de antenas (AAS), incluso mejoras a la formación de haz en elevación y aspectos de las redes auto-organizadas (SON) para AAS.
- Señalización optimizada para dar soporte a transmisión y recepción multi-punto coordinadas (CoMP) entre sitios.
- Optimizaciones a la agregación de portadoras (CA) para dar soporte a un máximo de 32 portadoras.
- Optimizaciones a la conectividad dual (DC) para dar mejor soporte a despliegues multi-proveedor con mejor conducción del tráfico.
- Mejoras en la red de radio acceso (RAN).
- Optimización a comunicaciones tipo máquina (MTC): el objetivo es definir un nuevo tipo de categoría que reduzca el ancho de banda, la energía de transmisión, el soporte para modos de transmisión de descarga y la disminución del consumo de la batería mediante una reducción del consumo de energía y extendiendo la cobertura de la operación.
- Acceso asistido por licencia para LTE (LAA-LTE), en el que LTE puede desplegarse en espectro sin licencia: este ítem será una opción atractiva para que los operadores utilicen bandas sin licencia con una red unificada, lo que redundará en un ahorro de costos, una mejor eficiencia espectral y una mejoría en la experiencia del usuario.
- Agregación de red de área local inalámbrica (WLAN) LTE (LWA), donde el portador de datos puede ser servido por el enlace de radio LTE y/o Wi-Fi mediante agregación LTE-WLAN.

Adicional, para HSPA+ las únicas combinaciones de bandas siendo estandarizadas como parte del *release 13*, son *Carrier Aggregation* en configuración Dual Banda UL, con lo cual se esperan mejoras en el rendimiento del sistema y de la capacidad de la red. Por ejemplo, cuando se utiliza en combinación con multiportadora en Dual Banda en *uplink*, ambas portadoras en estado de servidora y no servidora, pueden ser eficientemente explotadas, logrando una mejor carga balanceada en *uplink*.

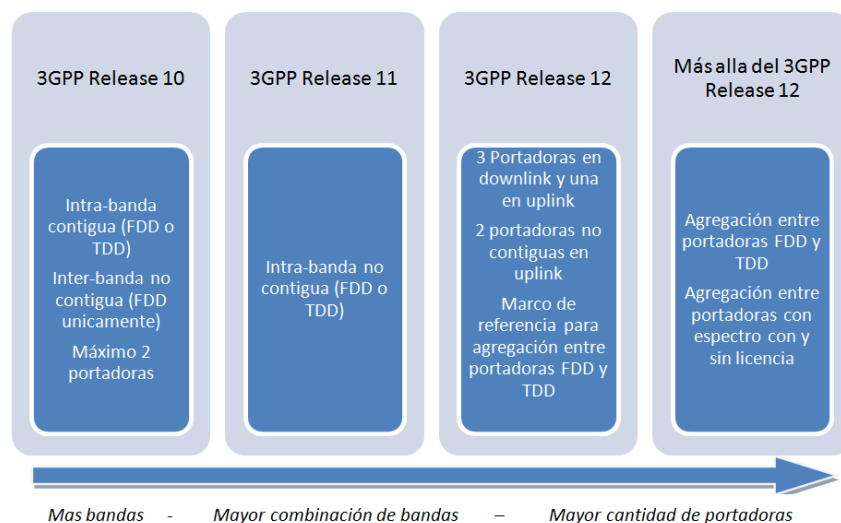
²² 4G AMÉRICAS. Inside 3GPP release 13: Understanding the standards for HSPA+ and LTE-Advanced enhancements. Resumen ejecutivo. [En línea]. 2015. [13-Enero-2016]. Disponible en: http://www.4gamericas.org/files/3714/4224/8256/Executive_Summary_3GPP_Release_13_final.pdf

4.3 LTE-ADVANCED CARRIER AGGREGATION

4.3.1 Principios de operación. Con la estandarización de la 3GPP, la cual define que el ancho de banda debe estar entre los 1.4 MHz y los 20 MHz y debido a que la mayoría de operadores tienen asignaciones de espectro menores a 20 MHz en bloques contiguos o múltiples bandas en bloques de espectro no contiguos, se producen limitantes en el uso de una única portadora en LTE con un bloque de 20 MHz, y más aun teniendo en cuenta que el principal objetivo de *LTE-Advanced* es soportar un máximo ancho de banda de 100MHz. De otro lado, debido a las condiciones que impone el uso limitado del espectro radioeléctrico, se presentan barreras en la asignación de bloques de gran tamaño y en las frecuencias disponibles sobre cada banda establecida por la 3GPP. Para solucionar este problema y debido a la necesidad de ampliar la capacidad de la red optimizando la experiencia de navegación del usuario, como solución a la creciente demanda de tráfico por la masificación de los servicios de voz y datos, *LTE-Advanced* a partir de la versión 10 (*release 10*) introduce una nueva técnica llamada *Carrier Aggregation* (CA) o agregación de portadora, la cual permite según la 3GPP [1], que un terminal móvil (UE) pueda transmitir y recibir hasta en 5 portadoras que se encuentren separadas, cada una con un máximo de 20MHz de ancho de banda, soportando un máximo ancho de banda de 100MHz.

En la Figura 9, se muestra la evolución de la funcionalidad de *Carrier Aggregation* desde el release 10, en donde se describen las principales características que permiten combinar diferentes portadoras de la misma banda (intra-banda contigua sin espaciamentos entre portadoras), portadoras en la misma banda pero con espaciamiento entre ellas (intra-banda no contigua) o combinación de portadoras que pertenecen a bandas de frecuencia de operación diferentes (inter-banda no contigua).

Figura 9. Evolución de Carrier Aggregation en 3GPP



Fuente: Los autores.

Con base en la evolución de la funcionalidad de *Carrier Aggregation* en cada uno de los diferentes *release*, la máxima velocidad de transmisión en el enlace descendente está determinado por el ancho de banda total obtenido luego de la combinación de varias portadoras. La 3GPP considera una velocidad máxima teórica de descarga de 450 Mbps cuando se combinan tres portadoras cada una con un ancho de banda de 20 MHz. De igual forma, se considera una velocidad de descarga de 300 Mbps al combinar dos señales portadoras con un ancho de banda total de 40 MHz. En el Cuadro 4 se observan diferentes anchos de banda obtenidos en CA y sus respectivas velocidades de descarga teóricas.

Cuadro 4. Velocidades de descarga para CA de acuerdo al ancho de banda total agregado

Ancho de banda total (MHz)	Máxima velocidad de descarga (Mbps)
5	37.5
10	75
15	112.5
20	150
25	187.5
30	225
35	262.5
40	300
60	450

Fuente: KIYOSHIMA, Kohei; TAKIGUCHI, Takahiro; KAWABE, Yasuhiro y SASAKI, Yusuke. Commercial Development of LTE-Advanced applying Advanced C-RAN Architecture.

4.3.2 Tipos de Carrier Aggregation. En *Carrier Aggregation*, múltiples portadoras LTE, tanto en el enlace de subida como en el enlace de bajada, en bandas de frecuencias contiguas o no contiguas pueden ser agrupadas²³. Esta funcionalidad permite a los operadores multiplicar el ancho de banda, utilizando los recursos de radio sobre diferentes portadoras, lo cual se traduce en una mayor capacidad de la red y altas velocidades de navegación. Cada señal portadora es llamada Componente de Carrier (CC) y puede tener un ancho de banda de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz o 20 MHz, con un máximo de hasta 5 CC, para ser agregadas en CA, obteniendo de esta forma un máximo de 100 MHz de ancho de banda. Existen tres tipos de *Carrier Aggregation* que han sido definidos por la 3GPP, para suplir diferentes escenarios de combinaciones de espectro a los operadores móviles, como se muestra en la Figura 10²⁴.

4.3.2.1 Agregación intra-banda con componentes contiguas. Consiste en el uso de componentes de portadoras contiguas que se encuentran sobre la misma banda de frecuencia de operación. Según Mohammed²⁵, en este escenario las portadoras están separadas por un múltiplo de 300KHz con el fin de preservar la ortogonalidad entre las subportadoras y que no exista interferencia entre estas. Esta opción es una de las opciones más viables teóricamente debido a

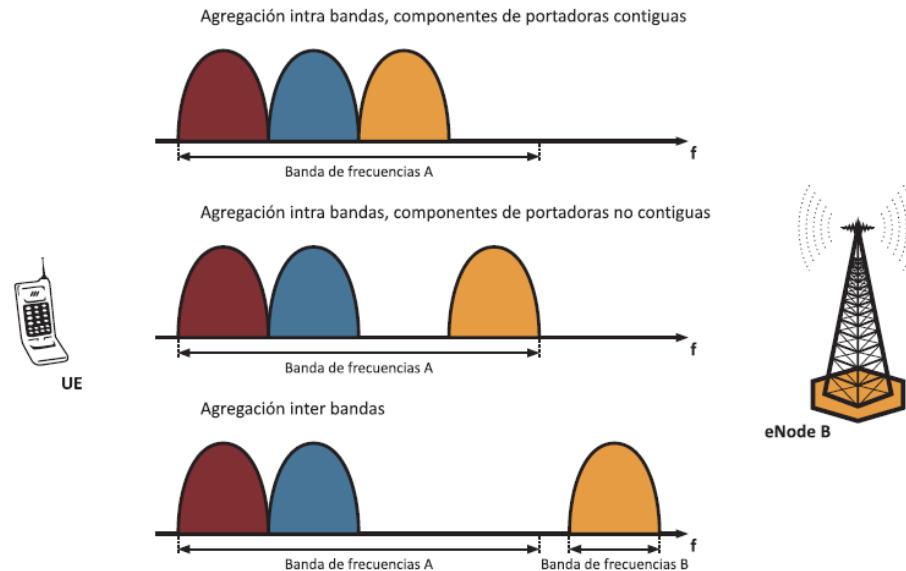
²³ EIKO, Seidel. LTE-A Carrier Aggregation enhancements in release 11. Munich: Nomor Research. 2012. p.1

²⁴ BECVAR, Zdenek; MACH, Pavel y PRAVDA, Iván. Op. cit., p. 68-69.

²⁵ MOHAMMED, Al-Shibli; MOHAMED, Habaebi y JALEL, Chebil. Carrier Aggregation in Long Term Evolution Advanced. En: IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), 2012 World Congress on (Jul. 16 2012-Jul. 17 2012: Shah Alam, Selangor). Memorias. IEEE: 2012. p. 155

que es la forma más fácil de implementación teniendo en cuenta que sus costos son menores, en este caso solo se necesita de un transmisor dado que la banda resultante después de la agregación de portadoras, puede ser vista como un único componente desde el terminal de usuario (UE) y no hay requerimientos especiales ni en el UE ni en la estación base (*e-NodeB*).

Figura 10. Tipos de Carrier Aggregation



Fuente: BECVAR, Zdenek; MACH, Pavel y PRAVDA, Iván. Redes Móviles

4.3.2.2 Agregación intra-banda con componentes no contiguas. Consiste en el uso de portadoras que se encuentran sobre la misma banda de operación pero con un espaciamiento entre ellas. Según Becvar²⁶, este tipo de CA es más difícil de implementar debido a que la señal no puede ser interpretada como una sola transmisión de forma que se requieren mínimo dos transmisores o más lo cual aumenta el costo de los equipos.

4.3.2.3 Agregación inter-banda con componentes no contiguas. Este tipo de CA consiste en el uso de portadoras que pertenecen a bandas de frecuencia de operación diferentes. Según Mohammed²⁷, debido a la separación de las portadoras en las diferentes bandas de frecuencia, son necesarios más transmisores y receptores tanto en el terminal móvil como en la estación base. Con este tipo de agregación de portadora la robustez de la movilidad puede ser potencialmente mejorada debido a las características de propagación y las frecuencias utilizadas en cada banda de operación.

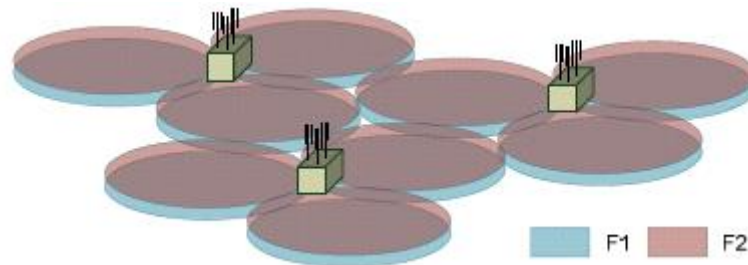
²⁶ BECVAR, Zdenek; MACH, Pavel y PRAVDA, Iván. Op. cit., p. 68

²⁷ MOHAMMED, Al-Shibli; MOHAMED, Habaebi y JALEL, Chebil. Op. cit., p. 155

4.3.3 Escenarios de implementación. Como ya se ha mencionado anteriormente, el objetivo de CA es mejorar la velocidad que se ofrece a los usuarios. Con este tipo de tecnología se puede presentar distintos tipos de despliegues a nivel de red obteniendo 4 escenarios distintos como se mencionarán a continuación²⁸.

4.3.3.1 Escenario 1. En este escenario las celdas bajo las frecuencias F1 y F2 se encuentran ubicadas en el mismo sitio de tal forma que ofrezcan el mismo patrón de radiación y cobertura. Este escenario aplica siempre y cuando las componentes de las portadoras pertenezcan a la misma banda de frecuencia por ejemplo 2GHz, 800 MHz, etc. En la Figura 11 se muestra la distribución de las celdas para el escenario 1.

Figura 11. Escenario 1 de implementación de CA



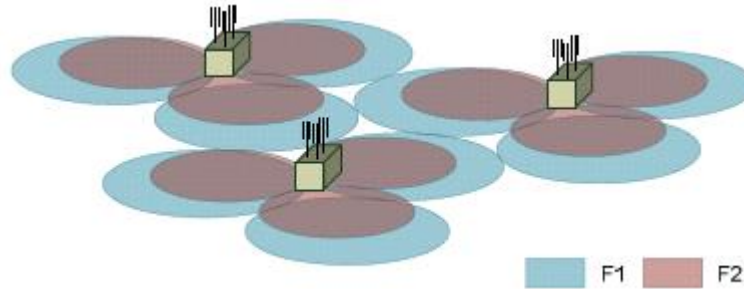
Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 36.300

4.3.3.2 Escenario 2. En este escenario, Figura 12, las celdas bajo las frecuencias F1 y F2 se encuentran ubicadas en el mismo sitio y corresponden a bandas de frecuencias diferentes. En este caso F2 tiene una cobertura más pequeña debido a las condiciones de propagación por poseer una frecuencia superior a F1. F1 es una frecuencia menor a F2 lo cual ofrece una amplia cobertura, tan solo F2 se utiliza para mejorar la tasa de transferencia de datos. Este es el escenario típico cuando F1 y F2 se encuentren en bandas diferentes, por ejemplo F1 en 800 MHz y F2 en 3,5 GHz.

Este escenario es muy adecuado para un operador de comunicaciones que tenga disperso la distribución de sus portadoras en diferentes bandas de frecuencia, en donde la cobertura estará dada por las frecuencias inferiores. Para portadoras en la misma banda de frecuencia es posible controlar las potencias de transmisión y recepción con el fin de reducir la interferencia entre las celdas y obtener coberturas diferentes.

²⁸ The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 36.300: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN). Overall description. Stage 2. [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/dynareport/36300.htm>

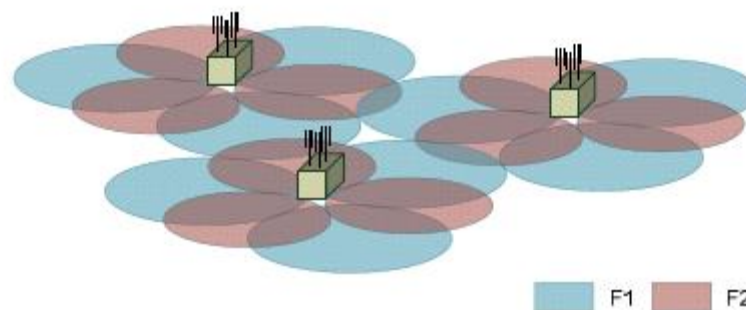
Figura 12. Escenario 2 de implementación de CA



Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 36.300

4.3.3.3 Escenario 3. Las antenas en cada una de las portadoras pueden tener distintas orientaciones y patrones de radiación. Las antenas de F2 se direccionan a los bordes de la celda F1, de forma que se aumenta el rendimiento de borde de la celda. En este escenario, Figura 13, F1 brinda una mejor cobertura con respecto a F2 que posee agujeros. Este es el escenario típico cuando F1 y F2 se encuentran en bandas diferentes por ejemplo 800 MHz y 3GHz respectivamente.

Figura 13. Escenario 3 de implementación de CA

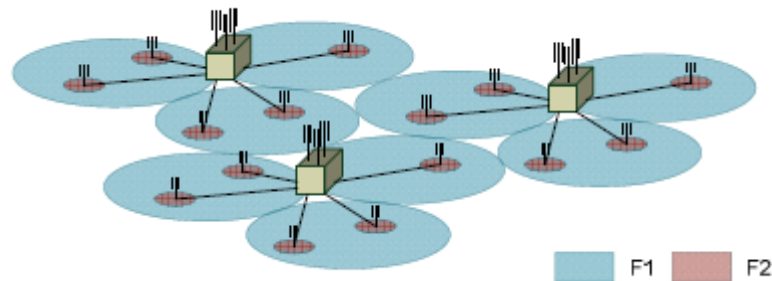


Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 36.300

4.3.3.4 Escenario 4. En este escenario, F1 ofrece suficiente cobertura, sin embargo se presentan zonas de muy alto tráfico en donde son ubicadas unas celdas denominadas RRH (*Remote Radio Head*) con el fin de aumentar la capacidad usando la frecuencia F2. Estas celdas se conectan al eNB a través de fibra óptica y otros medios. Este escenario se presenta cuando F1 y F2 son portadoras no contiguas en la misma banda de frecuencia (por ejemplo 1,7GHz) o en diferentes bandas (F1= 800 MHz y F2 = 3,5 GHz). En la Figura 14 se muestra el escenario.

4.3.4 Configuraciones de Carrier Aggregation. *Carrier Aggregation* es la característica principal de *LTE-Advanced* que permite a los operadores de comunicaciones móviles crear mayores anchos de banda para los servicios LTE, combinando asignaciones de espectro separadas.

Figura 14. Escenario 4 de implementación de CA



Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 36.300

Las combinaciones en CA están especificadas en la 3GPP. Los requerimientos para el terminal de usuario son definidos en la especificación técnica TS 36.101, mientras que las especificaciones para la estación base (BS) se definen en el TS 36.104.

Estas combinaciones están divididas en inter-banda e intra-banda (contigua y no contigua). Las combinaciones intra-banda e inter-banda contigua agregan dos componentes de Carrier (CCs), es decir dos portadoras en *downlink* las cuales son especificadas en la versión 10 (*release 10*). El *release 11* ofrece muchas más combinaciones de CA, incluyendo la intra-banda no contigua e inter-banda para la banda 29. El *release 12* incluye CA para bandas de frecuencia FDD y TDD, así como el soporte para la agregación de dos componentes de Carrier en *uplink* y tres en *downlink*.

El *release 10* es el primero en soportar CA y define una variedad limitada de configuraciones de CA, en donde se incluye intra-banda contigua para banda 1 y banda 40 nombradas como CA_1C y CA_40C como se muestra en el Cuadro 5. Es de anotar que para este caso se cuentan con 2 portadoras tanto en *uplink* como en *downlink*.

Para la configuración inter-banda de *Carrier Aggregation* se tiene las bandas 1 y 5, nombradas como CA_1A-5A. Para esta opción se cuentan con 2 portadoras en *downlink* y 1 en *uplink* como se muestra en el Cuadro 6²⁹. En cada uno de estos cuadros se relacionan las bandas de operación estandarizadas en la normatividad 3GPP con sus respectivas frecuencias de operación tanto en *uplink* como en *downlink*, es decir las frecuencias utilizadas para transmisión desde el terminal móvil hacia la estación base y viceversa para el caso de *downlink*, así como también el modo de multiplexación soportado (FDD/TDD).

²⁹ The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 104 V10.2.0: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 10.2.0 Release 10). Francia: ETSI, 2011. 15p.

Cuadro 5. Configuración Carrier Aggregation intra-banda contigua según release 10

Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
		UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
		FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHZ)	-	FDL_HIGH (MHZ)	
CA_40C	40	2300	-	2400	2300	-	2400	TDD
CA_1C	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 104 V10.2.0

Cuadro 6. Configuración Carrier Aggregation Inter-banda no contigua según release 10

Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
		UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
		FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHz)	-	FDL_HIGH (MHz)	
CA_1-5	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	5	824	-	849	869	-	894	

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 104 V10.2.0

La 3GPP para el *release* 11 cuenta con muchas más combinaciones de *Carrier Aggregation*, agregando la intra-banda no contigua y la banda 29 para inter-banda, esta última se caracteriza porque cuenta con un componente de *downlink* pero no cuenta con componente de *uplink*. El objetivo principal de esta banda es que se utilice para la expansión del ancho de banda. Las combinaciones de banda que se tiene en este *release* se muestran en el Cuadro 7, Cuadro 8 y Cuadro 9³⁰. En cada uno de estos cuadros se relacionan las bandas de operación estandarizadas en la normatividad 3GPP con sus respectivas frecuencias de operación tanto en *uplink* como en *downlink*, así como también el modo de multiplexación soportado (FDD/TDD).

Cuadro 7. Configuración Carrier Aggregation intra-banda contigua según release 11

3GPP	Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
			UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
			FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHz)	-	FDL_HIGH (MHz)	
Rel. 10	CA_1	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
Rel. 11	CA_7	7	2500	-	2570	2620	-	2690	FDD
Rel. 11	CA_38	38	2570	-	2620	2570	-	2620	TDD
Rel. 10	CA_40	40	2300	-	2400	2300	-	2400	TDD
Rel. 11	CA_41	41	2496	-	2690	2490	-	2690	TDD

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V11.4.0

³⁰The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V11.4.0: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 11.4.0 Release 11). Francia: ETSI, 2013. 21-23p.

Cuadro 8. Configuración Carrier Aggregation inter-banda según release 11

3GPP	Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
			UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
			FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHz)	-	FDL_HIGH (MHz)	
Rel. 10	CA_1-5	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
		5	824	-	849	869	-	894	
Rel.11	CA_1-18	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
		18	815	-	830	860	-	875	
Rel.11	CA_1-19	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
		19	830	-	845	875	-	890	
Rel.11	CA_1-21	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
		21	1447.9	-	1462.9	1495.9	-	1510.9	
Rel.11	CA_2-17	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
		17	704	-	716	734	-	746	
Rel.11	CA_2-29	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
		29	N/A			717	-	728	
Rel.11	CA_3-5	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
		5	824	-	849	869	-	894	
Rel.11	CA_3-7	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
		7	2500	-	2570	2620	-	2690	
Rel.11	CA_3-8	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
		8	880	-	915	925	-	960	
Rel.11	CA_3-20	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
		20	832	-	862	791	-	821	
Rel.11	CA_4-5	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
		5	824	-	849	869	-	894	
Rel.11	CA_4-7	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
		7	2500	-	2570	2620	-	2690	
Rel.11	CA_4-12	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
		12	699	-	716	729	-	746	
Rel.11	CA_4-13	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
		13	777	-	787	746	-	756	
Rel.11	CA_4-17	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
		17	704	-	716	734	-	746	
Rel.11	CA_4-29	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
		29	N/A			717	-	728	
Rel.11	CA_5-12	5	824	-	849	869	-	894	FDD
		12	699	-	716	729	-	746	
Rel.11	CA_5-17	5	824	-	849	869	-	894	FDD
		17	704	-	716	734	-	746	
Rel.11	CA_7-20	7	2500	-	2570	2620	-	2690	FDD
		20	832	-	862	791	-	821	
Rel.11	CA_8-20	8	880	-	915	925	-	960	FDD
		20	832	-	862	791	-	821	
Rel.11	CA_11-18	11	1427.9	-	1447.9	1475.9	-	1495.9	FDD
		18	815	-	830	860	-	875	

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V11.4.0

Cuadro 9. Configuración Carrier Aggregation intra-banda no contigua según release 11

3GPP	Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
			UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
			FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHz)	-	FDL_HIGH (MHz)	
Rel. 11	CA_25-25	25	1850	-	1915	1930	-	1995	FDD

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V11.4.0

Actualmente ya se cuenta con el *release* 12, el cual está incluyendo para *Carrier Aggregation* las bandas de frecuencia FDD y TDD, así como el soporte de dos componentes de *Carrier* para *uplink* y tres componentes para *downlink* en algunas de las combinaciones, además de soportar configuraciones de *uplink* de inter-banda e intra-banda no contigua. En este *release* se incluye la banda 32 (1.5GHz Banda L) la cual cuenta con un único componente de *Carrier* para *downlink*. Por otro lado, este *release* ayuda a mejorar las capacidades de la funcionalidad que aún se encuentran en estudio.

En el Cuadro 10, Cuadro 11, Cuadro 12 y Cuadro 13 se observan las combinaciones que se generaron con este *release*³¹, en donde se especifican las combinaciones de bandas de frecuencias para las configuraciones de CA intra-banda contigua, inter-banda haciendo uso de 2 bandas de frecuencia diferentes, inter-banda con 3 bandas de frecuencia e inter-banda no contigua. En cada uno de estos cuadros se relacionan las bandas de operación estandarizadas en la normatividad 3GPP con sus respectivas frecuencias de operación tanto en *uplink* como en *downlink*, así como también el modo de multiplexación soportado (FDD/TDD).

Cuadro 10. Configuración Carrier Aggregation intra-banda contigua según release 12

Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
		UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
		FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHz)	-	FDL_HIGH (MHz)	
CA_1	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
CA_3	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
CA_7	7	2500	-	2570	2620	-	2690	FDD
CA_23	23	2000	-	2020	2180	-	2200	FDD
CA_27	27	807	-	824	852	-	869	FDD
CA_38	38	2570	-	2620	2570	-	2620	TDD
CA_39	39	1880	-	1920	1880	-	1920	TDD
CA_40	40	2300	-	2400	2300	-	2400	TDD
CA_41	41	2496	-	2690	2490	-	2690	TDD
CA_42	42	3400	-	3600	3400	-	3600	TDD

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

³¹ The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 12.5.0 Release 12). Francia: ETSI, 2014. 24-29p.

Cuadro 11. Configuración Carrier Aggregation inter-banda dos bandas según release 12

Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
		UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
		FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHz)	-	FDL_HIGH (MHz)	
CA_1-3	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	3	1710	-	1785	1805	-	1880	
CA_1-5	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	5	824	-	849	869	-	894	
CA_1-7	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	7	2500	-	2570	2620	-	2690	
CA_1-8	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	8	880	-	915	925	-	960	
CA_1-11	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	11	1427.9	-	1447.9	1475.9	-	1495.9	
CA_1-18	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	18	815	-	830	860	-	875	
CA_1-19	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	19	830	-	845	875	-	890	
CA_1-20	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	20	832	-	862	791	-	821	
CA_1-21	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	21	1447.9	-	1462.9	1495.9	-	1510.9	
CA_1-26	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	26	814	-	849	859	-	894	
CA_1-42	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	42	3400	-	3600	3400	-	3600	TDD
CA_2-4	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	4	1710	-	1755	2110	-	2155	
CA_2-4-4	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	4	1710	-	1755	2110	-	2155	
CA_2-5	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	5	824	-	849	869	-	894	
CA_2-2-5	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	5	824	-	849	869	-	894	
CA_2-12	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	12	699	-	716	729	-	746	
CA_2-13	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	13	777	-	787	746	-	756	
CA_2-2-13	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	13	777	-	787	746	-	756	
CA_2-17	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	17	704	-	716	734	-	746	
CA_2-29	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	29	N/A			717	-	728	
CA_2-30	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	30	2305	-	2315	2350	-	2360	
CA_3-5	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
	5	824	-	849	869	-	894	
CA_3-7	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
	7	2500	-	2570	2620	-	2690	

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 11. Configuración Carrier Aggregation inter-banda dos bandas según release 12 (Continuación)

Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
		UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
		FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHz)	-	FDL_HIGH (MHz)	
CA_3-8	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
	8	880	-	915	925	-	960	
CA_3-19	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
	19	830	-	845	875	-	890	
CA_3-20	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
	20	832	-	862	791	-	821	
CA_3-26	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
	26	814	-	849	859	-	894	
CA_3-27	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
	27	807	-	824	852	-	869	
CA_3-28	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
	28	703	-	748	758	-	803	
CA_4-5	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	5	824	-	849	869	-	894	
CA_4-7	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	7	2500	-	2570	2620	-	2690	
CA_4-12	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	12	699	-	716	729	-	746	
CA_4-4-12	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	12	699	-	716	729	-	746	
CA_4-13	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	13	777	-	787	746	-	756	
CA_4-4-13	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	13	777	-	787	746	-	756	
CA_4-17	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	17	704	-	716	734	-	746	
CA_4-27	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	27	807	-	824	852	-	869	
CA_4-29	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	29	N/A			717	-	728	
CA_4-30	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	30	2305	-	2315	2350	-	2360	
CA_5-7	5	824	-	849	869	-	894	FDD
	7	2500	-	2570	2620	-	2690	
CA_5-12	5	824	-	849	869	-	894	FDD
	12	699	-	716	729	-	746	
CA_5-17	5	824	-	849	869	-	894	FDD
	17	704	-	716	734	-	746	
CA_5-25	5	824	-	849	869	-	894	FDD
	25	1850	-	1915	1930	-	1995	
CA_5-30	5	824	-	849	869	-	894	FDD
	30	2305	-	2315	2350	-	2360	
CA_7-20	7	2500	-	2570	2620	-	2690	FDD
	20	832	-	862	791	-	821	
CA_7-28	7	2500	-	2570	2620	-	2690	FDD
	28	703	-	748	758	-	803	

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 11. Configuración Carrier Aggregation inter-banda dos bandas según release 12 (Continuación)

Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
		UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
		FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHz)	-	FDL_HIGH (MHz)	
CA_8-11	8	880	-	915	925	-	960	FDD
	11	1427.9	-	1447.9	1475.9	-	1495.9	
CA_8-20	8	880	-	915	925	-	960	FDD
	20	832	-	862	791	-	821	
CA_8-40	8	880	-	915	925	-	960	FDD
	40	2300	-	2400	2300	-	2400	TDD
CA_11-18	11	1427.9	-	1447.9	1475.9	-	1495.9	FDD
	18	815	-	830	860	-	875	
CA_12-25	12	699	-	716	729	-	746	FDD
	25	1850	-	1915	1930	-	1995	
CA_12-30	12	699	-	716	729	-	746	FDD
	30	2305	-	2315	2350	-	2360	
CA_18-28	18	815	-	830	860	-	875	FDD
	28	703	-	733	758	-	788	
CA_19-21	19	830	-	845	875	-	890	FDD
	21	1447.9	-	1462.9	1495.9	-	1510.9	
CA_19-42	19	830	-	845	875	-	890	FDD
	42	3400	-	3600	3400	-	3600	TDD
CA_20-32	20	832	-	862	791	-	821	FDD
	32	N/A			1452	-	1496	
CA_23-29	23	2000	-	2020	2180	-	2200	FDD
	29	N/A			717	-	728	
CA_29-30	29	N/A			717	-	728	FDD
	30	2305	-	2315	2350	-	2360	
CA_39-41	39	1880	-	1920	1880	-	1920	TDD
	41	2496	-	2690	2496	-	2690	
CA_41-42	41	2496	-	2690	2496	-	2690	TDD
	42	3400	-	3600	3400	-	3600	

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 12. Configuración Carrier Aggregation inter-banda tres bandas según release 12

Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
		UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
		FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHz)	-	FDL_HIGH (MHz)	
CA_1-3-5	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	3	1710	-	1785	1805	-	1880	
	5	824	-	849	869	-	894	
CA_1-3-8	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	3	1710	-	1785	1805	-	1880	
	8	880	-	915	925	-	960	
CA_1-3-19	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	3	1710	-	1785	1805	-	1880	
	19	830	-	845	875	-	890	

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 12. Configuración Carrier Aggregation inter-banda tres bandas según release 12 (Continuación)

Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
		UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
		FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHz)	-	FDL_HIGH (MHz)	
CA_1-3-20	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	3	1710	-	1785	1805	-	1880	
	20	832	-	862	791	-	821	
CA_1-5-7	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	5	824	-	849	869	-	894	
	7	2500	-	2570	2620	-	2690	
CA_1-7-20	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	7	824	-	849	869	-	894	
	20	832	-	862	791	-	821	
CA_1-19-21	1	1920	-	1980	2110	-	2170	FDD
	19	830	-	845	875	-	890	
	21	1447.9	-	1462.9	1495.9	-	1510.9	
CA_2-4-5	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	4	1710	-	1755	2110	-	2155	
	5	824	-	849	869	-	894	
CA_2-4-12	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	4	1710	-	1755	2110	-	2155	
	12	699	-	716	729	-	746	
CA_2-4-13	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	4	1710	-	1755	2110	-	2155	
	13	777	-	787	746	-	756	
CA_2A-5A-12A	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	5	824	-	849	869	-	894	
	12	699	-	716	729	-	746	
CA_2-5-30	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	5	824	-	849	869	-	894	
	30	2305	-	2315	2350	-	2360	
CA_2-12-30	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	12	699	-	716	729	-	746	
	30	2305	-	2315	2350	-	2360	
CA_2-29-30	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
	29	N/A			717	-	728	
	30	2305	-	2315	2350	-	2360	
CA_3-7-20	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
	7	2500	-	2570	2620	-	2690	
	20	832	-	862	791	-	821	
CA_4-5-30	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	5	824	-	849	869	-	894	
	30	2305	-	2315	2350	-	2360	
CA_4-12-30	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	12	699	-	716	729	-	746	
	30	2305	-	2315	2350	-	2360	
CA_4-29-30	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
	29	N/A			717	-	728	
	30	2305	-	2315	2350	-	2360	

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 13. Configuración Carrier Aggregation intra-banda no contigua con dos sub-bloques según release 12

Configuración de CA	Banda de operación en E-UTRA	Banda uplink (UL)			Banda downlink (DL)			Modo Dúplex
		UE transmite / BS Recibe			UE recibe / BS transmite			
		FUL_LOW (MHz)	-	FUL_HIGH (MHz)	FDL_LOW (MHz)	-	FDL_HIGH (MHz)	
CA_2-2	2	1850	-	1910	1930	-	1990	FDD
CA_3-3	3	1710	-	1785	1805	-	1880	FDD
CA_4-4	4	1710	-	1755	2110	-	2155	FDD
CA_7-7	7	2500	-	2570	2620	-	2690	FDD
CA_23-23	23	2000	-	2020	2180	-	2200	FDD
CA_25-25	25	1850	-	1915	1930	-	1995	FDD
CA_41-41	41	2496	-	2690	2496	-	2690	TDD
CA_42-42	42	3400	-	3600	3400	-	3600	TDD

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

4.3.5 Ancho de banda del canal. En LTE el Ancho de Banda (BW) oscila entre los 1.4MHz y los 20 MHz de acuerdo con la estandarización 3GPP que se tiene actualmente, en la cual se definen las configuraciones de las interfaces de radio y de los equipos móviles (UE). En el Cuadro 14 se muestra los requisitos del BW del canal evidenciando la relación que se tiene con la configuración del ancho de banda de transmisión (NRB)³².

Cuadro 14. Relación entre el ancho de banda de transmisión y la configuración del NRB en E-UTRA

Ancho de banda del Canal BWChannel [MHz]	1.4	3	5	10	15	20
Configuración del ancho de banda de transmisión NRB	6	15	25	50	75	100

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

En la Figura 15 se muestra de manera gráfica la relación que existe entre el ancho de banda del canal y la configuración del ancho de banda de transmisión (NRB). Los bordes de los canales se definen como las frecuencias más bajas y más altas de la portadora separadas por el ancho de banda del canal.

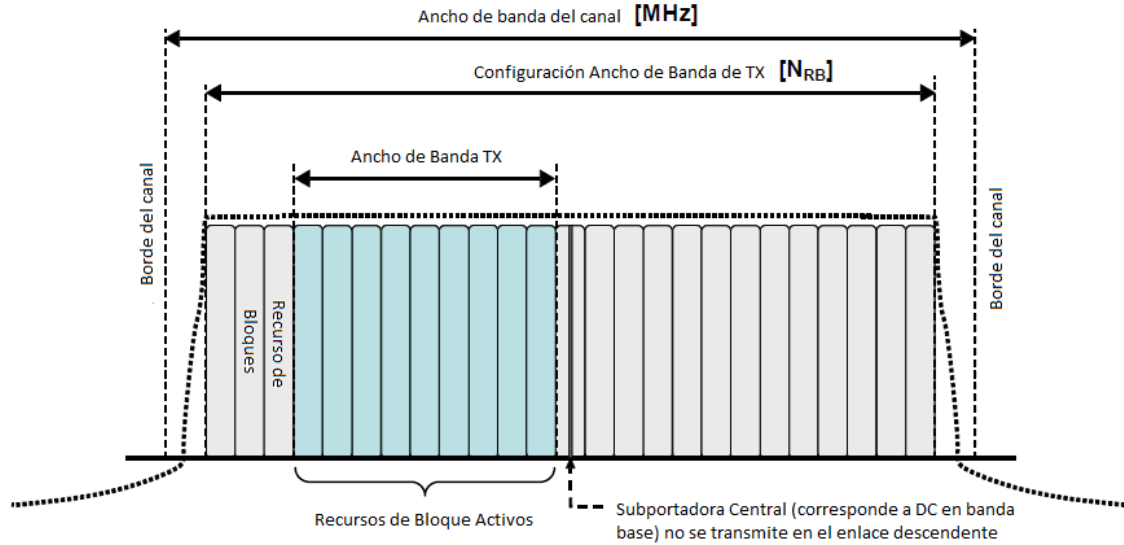
4.3.5.1 Clases de anchos de banda para Carrier Aggregation. Según la 3GPP, en el *release* 12³³, teniendo en cuenta que el BW oscila entre los 1.4MHz a los 20MHz de acuerdo a la normatividad que ha definido la 3GPP, con el fin de estandarizar las configuraciones de las interfaces de radio y las de los equipos móviles (UE), desde el *release* 11 de la norma TS 36.101 se ha definido la clase de ancho de banda (BW) para cada uno de los casos, teniendo en cuenta el número de Componentes de Carrier (CC) y la configuración de ancho de banda de transmisión agregada, que

³² Ibid., p. 29.

³³ Ibid., p. 34.

corresponde al número de bloques de recursos (NRB,agg.), que se puede tener dependiendo del ancho de banda BW utilizado. En el Cuadro 15 se relacionan las clases de ancho de banda que se pueden tener de acuerdo con el estándar.

Figura 15. Ancho de banda del canal y configuración del NRB para una portadora en E-UTRA



Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 15 .Clases de ancho de banda usados en Carrier Aggregation

Clases de Ancho de banda en CA	Configuración de ancho de banda de transmisión agregada	Número Máximo de CC
A	$NRB,agg \leq 100$	1
B	$25 < NRB,agg \leq 100$	2
C	$100 < NRB,agg \leq 200$	2
D	$200 < NRB,agg \leq 300$	3
E	$300 < NRB,agg \leq 400$	4
F	$400 < NRB,agg \leq 500$	5
Nota 1: La configuración de ancho de banda de transmisión NRB esta expresada en unidades de bloques de recursos RBs. Nota 2: la variable NRB,agg es el número de bloques de recursos agregados dentro del total del ancho de banda del canal.		

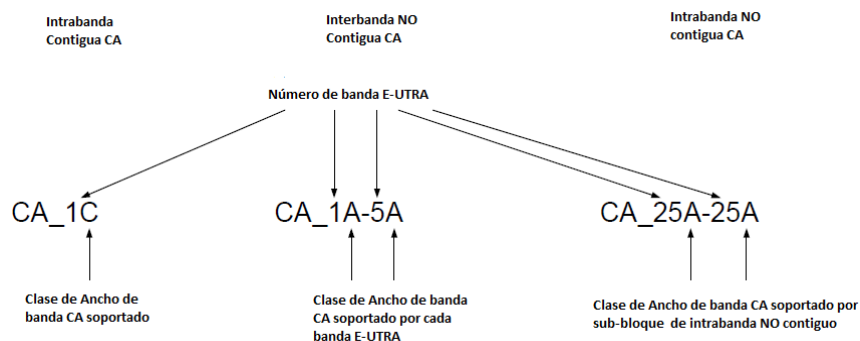
Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

En las especificaciones de la 3GPP se permite tener un espaciamento un poco más estrecho que el nominal. Sin embargo, con el fin de mantener la ortogonalidad entre los 15 KHz de OFDM y la compatibilidad con las especificaciones anteriores, la separación entre canales debe ser un múltiplo entre 15KHz y 100KHz; por ejemplo 300KHz el cual es un mínimo común múltiplo entre los dos valores anteriores. La separación mínima entre canales para cada ancho de banda se ha definido, sin embargo, sólo el espaciamento nominal ha sido verificado y garantizado para trabajar.

Para la configuración de CA se debe tener en cuenta el soporte de los anchos de banda de canal por cada banda de operación y las configuraciones aplicables de la agregación de CC según el BW para cada uno de los casos. Esta información está dada por el conjunto de combinaciones de ancho de banda y es definido para cada una de las combinaciones de CA. No puede haber más de una combinación de ancho de banda aplicable por configuración de CA. El conjunto real de combinación de ancho de banda soportado está indicada por la configuración de banda soportada combinación/CA teniendo en cuenta la capacidad del acceso de radio a nivel de UE.

La Figura 16 muestra las convenciones de nomenclatura que se usan actualmente para CA. Como ejemplo, según Tiwari³⁴, la configuración de *Carrier Aggregation* CA_1C, que está disponible en la 3GPP release 10, indica que el UE puede operar en la banda 1, con máximo dos componentes de *Carrier* continuas, con un máximo de 200RBs (bloque de recursos). Con esta combinación, la asignación de estos 200 RBs puede ser cualquiera de los 75 RBs en ambas bandas o 100 RBs en ambas bandas. La configuración CA_1A_5A indica que el terminal de usuario puede recibir o transmitir a través de dos portadoras separadas en la banda 1 y 5. La letra A indica la clase de ancho de banda en CA, para este caso el UE está en capacidad de operar con 100 bloques de recursos RBs a través de ambas bandas (correspondientes a 20 MHz de ancho de banda). La configuración CA_25A-25A indica que el terminal de usuario puede recibir o transmitir en dos portadoras que se encuentren separadas en la banda 25. Al ser clase A, el UE es capaz de operar en un máximo de 100 RBs a través de ambas bandas (correspondiente a 20 MHz).

Figura 16. Convenciones y nomenclatura usada para la configuración CA



Fuente: Los autores.

4.3.5.2 Configuraciones de Carrier Aggregation según el ancho de banda del canal. De acuerdo a los estándares que tiene la 3GPP para cada una de las combinaciones de *Carrier Aggregation*, se definen las configuraciones para cada tipo de CA que se deseen implementar, teniendo en cuenta las combinaciones de diferentes bandas de frecuencia de acuerdo al ancho de banda de cada canal permitido para la agregación de portadoras. La componente de carrier (CC) puede tener un ancho de banda de 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz o 20 MHz, con un máximo de 5 componentes, para obtener un máximo ancho de banda de 100 MHz. Estos requisitos se

³⁴ TIWARI, Op. cit. p 21.

especifican para todas las combinaciones apoyándose en la capacidad de acceso de radio del terminal.

Los requisitos para agregación de portadoras en intra-banda contigua y los conjuntos de combinaciones de acuerdo al ancho de banda se muestran en el Cuadro 16. Para la agregación de portadoras en combinación de inter-banda para dos bandas y los conjuntos de combinaciones en función del ancho de banda del canal se cuentan con las relacionadas en el Cuadro 17. En el Cuadro 18 se relacionan las diferentes opciones para la agregación de portadoras de intra-banda no contigua de 3 bandas y por último se relacionan las combinaciones de ancho de banda definidos para intra-banda no contigua con dos sub-bloques en la misma banda de frecuencias en el Cuadro 19. En cada una de estos cuadros se definen los anchos de banda mínimos y máximos soportados para utilizar la funcionalidad de *Carrier Aggregation* en función de las posibles combinaciones de bandas de frecuencia, así como también se define el ancho de banda máximo que se puede agregar de acuerdo a la combinación de bandas requerida.

Cuadro 16. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para intra-banda contigua

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Componentes de Carrier para aumentar la frecuencia de la portadora			Máximo BW agregado en MHz	Combinación de BW
		BW de canal permitido para agregación de portadora en MHz	BW de canal permitido para agregación de portadora en MHz	BW de canal permitido para agregación de portadora en MHz		
CA_1C	CA_1C	15	15		40	0
		20	20			
CA_2C	-	5	20		40	0
		10	15,20			
		15	10,15,20			
		20	5,10,15,20			
CA_3C	CA_3C	5,10,15	20		40	0
		20	5,10,15,20			
CA_7C	CA_7C	15	15		40	0
		20	20		40	1
		10	20			
		15	15,20			
		20	10,15,20			
CA_12B	-	5	5,10		15	0
CA_23B	-	10	10		20	0
		5	15			
CA_27B	-	1,4,3,5	5		13	0
		1,4,3	10			
CA_38C	CA_38C	15	15		40	0
		20	20			
CA_39C	CA_39C	5,10,15	20		35	0
		20	5,10,15			

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 16. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para intra-banda contigua (Continuación)

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Componentes de Carrier para aumentar la frecuencia de la portadora			Máximo BW agregado en MHz	Combinación de BW
		BW de canal permitido para agregación de portadora en MHz	BW de canal permitido para agregación de portadora en MHz	BW de canal permitido para agregación de portadora en MHz		
CA_40C	CA_40C	10	20		40	0
		15	15			
		20	10,20			
		10,15	20		40	1
		15	15			
		20	10,15,20			
CA_41C	CA_41C	10	20		40	0
		15	15			
		20	10,20			
		5,10	20		40	1
		15	10,15			
		20	5,10,15,20			
CA_40D	CA_40C	10,15,20	20	20	60	0
		20	10,15	20		
		20	20	10,15		
CA_41D	CA_41C	10	20	15	60	0
		10	15,20	20		
		15	20	10,15		
		15	10,15,20	20		
		20	15,20	10		
		20	5,10,15	15,20		
CA_42C	CA_42C	5,10,15,20	20		40	0
		20	5,10,15			
<p>Nota 1: La Configuración de <i>Carrier Aggregation</i> se refiere a una banda de operación y a una clase de ancho de banda, esta última, especificada en el Cuadro 15. La clase de ancho de banda define el número de componentes de <i>carrier</i> y el número de bloques de recursos para la transmisión de información. La ausencia de una clase de ancho de banda en una banda de operación, implica que esta sea soportada para todas las clases. Por ejemplo, la configuración CA_1C indica que soporta la banda 1 en clase C. Con esta clase de ancho de banda se pueden soportar hasta dos componentes de <i>carrier</i> y entre 100 y 200 bloques de recursos RBs.</p> <p>Nota 2: Para las diferentes combinaciones soportadas, la componente de <i>carrier</i> tanto en <i>downlink</i> como en <i>uplink</i> es igual.</p>						

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 17. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con dos bandas

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Ban das	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Máximo BW agregado	Combinaci ón de BW	
CA_1A-3A	CA_1A-3A	1			SI	SI	SI	SI	40	0	
		3			SI	SI	SI	SI			
CA_1A-5A	CA_1A-5A	1				SI			20	0	
		5				SI					
		1			SI	SI	SI	SI	30	1	
		5			SI	SI					
CA_1A-7A	CA_1A-7A	1			SI	SI	SI	SI	40	0	
		7				SI	SI	SI			
CA_1A-8A	CA_1A-8A	1			SI	SI	SI	SI	30	0	
		8			SI	SI					
		1			SI	SI			20	1	
		8			SI	SI					
		1			SI	SI	SI	SI	30	2	
		8		SI	SI	SI					
CA_1A-11A	-	1			SI	SI	SI	SI	30	0	
		11			SI	SI					
CA_1A-18A	-	1			SI	SI	SI	SI	35	0	
		18			SI	SI	SI				
		1			SI	SI			20	1	
		18			SI	SI					
CA_1A-19A	CA_1A-19A	1			SI	SI	SI	SI	35	0	
		19			SI	SI	SI				
CA_1A-20A	-	1			SI	SI	SI	SI	40	0	
		20			SI	SI	SI	SI			
CA_1A-21A	CA_1A-21A	1			SI	SI	SI	SI	35	0	
		21			SI	SI	SI				
CA_1A-26A	-	1			SI	SI	SI	SI	35	0	
		26			SI	SI	SI				
		1			SI	SI			20	1	
		26			SI	SI					
CA_1A-42A	-	1			SI	SI	SI	SI	40	0	
		42			SI	SI	SI	SI			
CA_1A-42C	-	1			SI	SI	SI	SI	60	0	
		42	Ver Cuadro 16								
CA_2A-4A	CA_2A-4A	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	40	0	
		4			SI	SI	SI	SI			
		2			SI	SI			20	1	
		4			SI	SI					
		2			SI	SI	SI	SI	40	2	
		4			SI	SI	SI	SI			
CA_2A-4A-4A	-	2			SI	SI	SI	SI	60	0	
		4	Ver la Cuadro 19 la combinación CA_4A-4A								
CA_2A-5A	CA_2A-5A	2			SI	SI	SI	SI	30	0	
		5			SI	SI					
CA_2A-2A-5A	-	2	Ver la Cuadro 19 la combinación CA-2A-2A							50	0
		5			SI	SI					

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 17. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con dos bandas (Continuación)

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Ban das	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Máximo BW agregado	Combinaci ón de BW	
CA_2A-12A	-	2			SI	SI	SI	SI	30	0	
		12			SI	SI					
		2			SI	SI	SI	SI	30	1	
		12		SI	SI	SI					
CA_2A-12B	-	2			SI	SI	SI	SI	35	0	
		12	Ver Cuadro 16								
CA_2A-13A	CA_2A-13A	2			SI	SI	SI	SI	30	0	
		13				SI					
		2			SI	SI			20	1	
		13				SI					
CA_2A-2A - 13A	-	2	VerCuadro 19 la combinación CA_2A-2A							50	0
		13				SI					
CA_2A-17A	-	2			SI	SI			20	0	
		17			SI	SI					
CA_2A-29A	-	2			SI	SI			20	0	
		29		SI	SI	SI					
		2			SI	SI			20	1	
		29			SI	SI					
		2			SI	SI	SI	SI	30	2	
		29			SI	SI					
CA_2A-30A	-	2			SI	SI	SI	SI	30	0	
		30			SI	SI					
CA_3A-5A	CA_3A-5A	3				SI	SI	SI	30	0	
		5			SI	SI					
		3				SI			20	1	
		5			SI	SI					
		3			SI	SI	SI	SI	30	2	
		5			SI	SI					
CA_3A-7A	CA_3A-7A	3			SI	SI	SI	SI	40	0	
		7				SI	SI	SI			
CA_3A-7C	-	3			SI	SI	SI	SI	60	0	
		7	Ver la combinación CA_7C del Cuadro 16								
CA_3C-7A	-	3	Ver la combinación CA_3C del Cuadro 16							60	0
		7			SI	SI	SI	SI			
CA_3A-8A	CA_3A-8A	3				SI	SI	SI	30	0	
		8			SI	SI					
		3				SI			30	1	
		8			SI	SI					
		3			SI	SI	SI	SI	30	2	
		8		SI	SI	SI					
CA_3A-19A	CA_3A-19A	3			SI	SI	SI	SI	35	0	
		19			SI	SI	SI				
CA_3A-20A	CA_3A-20A	3			SI	SI	SI	SI	30	0	
		20			SI	SI					
		3			SI	SI	SI	SI	40	1	
		20			SI	SI	SI	SI			

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 17. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con dos bandas (Continuación)

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Ban das	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Máximo BW agregado	Combinaci ón de BW
CA_3A-26A	CA_3A-26A	3			SI	SI	SI	SI	35	0
		26			SI	SI	SI			
		3			SI	SI			20	1
		26			SI	SI				
CA_3A-27A	-	3			SI	SI	SI	SI	30	0
27			SI	SI						
CA_3A-28A	-	3			SI	SI	SI	SI	40	0
28			SI	SI						
CA_4A-5A	CA_4A-5A	4			SI	SI			20	0
		5			SI	SI				
		4			SI	SI	SI	SI	30	1
		5			SI	SI				
CA_4A-4A-5A		4	Ver el Cuadro 19 la combinación CA_4A-4A						50	0
5			SI	SI						
CA_4A-7A	CA_4A-7A	4			SI	SI			30	0
7			SI	SI	SI	SI				
CA_4A-12A	CA_4A-12A	4	SI	SI	SI	SI			20	0
		12			SI	SI				
		4	SI	SI	SI	SI	SI	SI	30	1
		12			SI	SI				
		4			SI	SI	SI	SI	30	2
		12		SI	SI	SI				
		4			SI	SI			20	3
		12			SI	SI				
		4			SI	SI	SI	SI	30	4
		12			SI	SI				
CA_4A-4A - 12A	-	4	Ver el Cuadro 19 la combinación CA_4A-4A						50	0
12			SI	SI						
CA_4A-12B	-	4			SI	SI	SI	SI	35	0
12	Ver la combinación CA_12B del Cuadro 16									
CA_4A-13A	CA_4A-13A	4			SI	SI	SI	SI	30	0
		13				SI				
		4			SI	SI			20	1
		13				SI				
CA_4A-4A - 13A	-	4	Ver el Cuadro 19 la combinación CA_4A-4A						50	0
13				SI						
CA_4A-17A	CA_4A-17A	4			SI	SI			20	0
17			SI	SI						
CA_4A-27A	-	4			SI	SI	SI	SI	30	0
27		SI	SI	SI						
CA_4A-29A	-	4			SI	SI			20	0
		29		SI	SI	SI				
		4			SI	SI			20	1
		29			SI	SI				
		4			SI	SI	SI	SI	30	2
		29			SI	SI				

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 17. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con dos bandas (Continuación)

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Ban das	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Máximo BW agregado	Combinaci ón de BW
CA_4A-30A	-	4			SI	SI	SI	SI	30	0
		30			SI	SI				
CA_5A-7A	CA_5A-7A	5	SI	SI	SI	SI			30	0
		7				SI	SI	SI		
CA_5A-12A	CA_5A-12A	5			SI	SI			20	0
		12			SI	SI				
CA_5A-17A	-	5			SI	SI			20	0
		17			SI	SI				
CA_5A-25A	-	5			SI	SI			30	0
		25			SI	SI	SI	SI		
CA_5A-30A	-	5			SI	SI			20	0
		30			SI	SI				
CA_7A-20A	CA_7A-20A	7				SI	SI	SI	30	0
		20			SI	SI				
		7				SI	SI	SI	40	1
		20			SI	SI	SI	SI		
CA_7A-28A	CA_7A-28A	7			SI	SI	SI	SI	35	0
		28			SI	SI	SI			
CA_8A-11A	-	8			SI	SI			20	0
		11			SI	SI				
CA_8A-20A	-	8			SI	SI			20	0
		20			SI	SI				
		8		SI	SI	SI			20	1
		20			SI	SI				
CA_8A-40A	-	8			SI	SI			30	0
		40			SI	SI	SI	SI		
CA_11A-18A	-	11			SI	SI			25	0
		18			SI	SI	SI			
CA_12A-25A	-	12			SI	SI			30	0
		25			SI	SI	SI	SI		
CA_12A-30A	-	12			SI	SI			20	
		30			SI	SI				
CA_18A-28A	-	18			SI	SI	SI		25	0
		28			SI	SI				
CA_19A-21A	CA_19A-21A	19			SI	SI	SI		30	0
		21			SI	SI	SI			
CA_19A-42A	-	19			SI	SI	SI		35	0
		42			SI	SI	SI	SI		
CA_19A-42C	-	19			SI	SI	SI		55	0
		42	Ver la combinación CA_42C del Cuadro 16							
CA_20A-32A	-	20			SI	SI			30	0
		32			SI	SI	SI	SI		
CA_23A-29A	-	23			SI	SI	SI	SI	30	0
		29		SI	SI	SI				
		23			SI	SI			20	1
		29		SI	SI	SI				

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 17. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con dos bandas (Continuación)

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Ban das	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Máximo BW agregado	Combinaci ón de BW
CA_29A-30A	-	29			SI	SI			20	0
		30			SI	SI				
CA_39A-41A	CA_39A-41A	39				SI	SI	SI	40	0
		41						SI		
CA_41A- 42A	-	41				SI	SI	SI	40	0
		42				SI	SI	SI		

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 18. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con tres bandas

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Ban das	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Máximo BW agregad o	Combinación de BW
CA_1A-3A -5A	-	1			SI	SI	SI	SI	50	0
		3			SI	SI	SI	SI		
		5			SI	SI				
		1			SI	SI			40	1
		3			SI	SI	SI	SI		
		5			SI	SI				
CA_1A-3A -8A	-	1			SI	SI	SI	SI	50	0
		3			SI	SI	SI	SI		
		8		SI	SI	SI				
		1			SI	SI			40	1
		3			SI	SI	SI	SI		
		8		SI	SI	SI				
		1			SI	SI	SI		40	2
		3			SI	SI	SI			
		8		SI	SI	SI				
CA_1A-3A - 19A	-	1			SI	SI	SI	SI	55	0
		3			SI	SI	SI	SI		
		19			SI	SI	SI			
CA_1A-3A - 20A	-	1			SI	SI	SI	SI	60	0
		3			SI	SI	SI	SI		
		20			SI	SI	SI	SI		
CA_1A-5A -7A	-	1			SI	SI			40	0
		5			SI	SI				
		7				SI	SI	SI		
		1			SI	SI	SI	SI	50	1
		5			SI	SI				
		7				SI	SI	SI		
CA_1A-7A - 20A	-	1			SI	SI	SI	SI	50	0
		7				SI	SI	SI		
		20			SI	SI				

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 18. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con tres bandas (Continuación)

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Ban das	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Máximo BW agregad o	Combinación de BW
CA_1A-19A - 21A	-	1			SI	SI	SI	SI	50	0
		19			SI	SI	SI			
		21			SI	SI	SI			
CA_2A-4A -5A	-	2			SI	SI	SI	SI	50	0
		4			SI	SI	SI	SI		
		5			SI	SI				
CA_2A-4A - 12A	-	2			SI	SI	SI	SI	50	0
		4			SI	SI	SI	SI		
		12			SI	SI				
CA_2A-4A - 13A	-	2			SI	SI	SI	SI	50	0
		4			SI	SI	SI	SI		
		13				SI				
CA_2A-5A - 12A	-	2			SI	SI	SI	SI	40	0
		5			SI	SI				
		12			SI	SI				
CA_2A-5A - 30A	-	2			SI	SI	SI	SI	40	0
		5			SI	SI				
		30			SI	SI				
CA_2A-12A - 30A	-	2			SI	SI	SI	SI	40	0
		12			SI	SI				
		30			SI	SI				
CA_2A- 29A - 30A	-	2			SI	SI	SI	SI	40	0
		29			SI	SI				
		30			SI	SI				
CA_3A-7A - 20A	-	3			SI	SI	SI	SI	60	0
		7				SI	SI	SI		
		20			SI	SI	SI	SI		
CA_4A-5A - 12A	-	4			SI	SI	SI	SI	40	0
		5			SI	SI				
		12			SI	SI				
CA_4A-5A - 30A	-	4			SI	SI	SI	SI	40	0
		5			SI	SI				
		30			SI	SI				
CA_4A- 12A - 30A	-	4			SI	SI	SI	SI	40	0
		12			SI	SI				
		30			SI	SI				
CA_4A- 29A - 30A	-	4			SI	SI	SI	SI	40	0
		29			SI	SI				
		30			SI	SI				

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 19 .Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para intra-banda no contigua con dos sub-bloques

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Componentes de Carrier para aumentar la frecuencia de la portadora		Máximo BW agregado en MHz	Combinación de BW
		BW de canal permitidos para agregación de portadora en MHz	BW de canal permitidos para agregación de portadora en MHz		
CA_2A -2A	-	5,10,15,20	5,10,15,20	40	0
CA_3A -3A	-	5,10,15,20	5,10,15,20	40	0
CA_4A -4A	CA_4A -4A	5,10,15,20	5,10,15,20	40	0
CA_7A -7A		5	15	40	0
		10	10,15		
		15	15,20		
		20	20		
CA_23A -23A		5	10	15	0
CA_25A -25A		5,10	5,10	20	0
		5,10,15,20	5,10,15,20	40	1
CA_41A -41A		10,15,20	10,15,20	40	0
		5,10,15,20	5,10,15,20	40	1
CA_41A -41C		5,10,15,20	Ver Cuadro 16	60	0
CA_41C -41A		Ver Cuadro 16	5,10,15,20	60	0
CA_42A -42A		5,10,15,20	5,10,15,20	40	0

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

5. ESTADO DE ARTE DE LA IMPLEMENTACIÓN DE CARRIER AGGREGATION EN EL MUNDO

Uno de los motores más importantes de la evolución tecnológica ha sido la mejora continua en la conectividad inalámbrica, y con ella han surgido nuevas necesidades para aumentar las velocidades y experiencia de navegación del usuario, dada la exigencia de las novedosas aplicaciones multimedia, que requieren mayores recursos y redes robustas para el transporte de grandes cantidades de información.

Carrier Aggregation, característica de *LTE-Advanced* en *release 10*, se está convirtiendo en la solución a los problemas de bajas tasas de transferencia de información para las aplicaciones y servicios multimedia actuales y es absolutamente fundamental para la evolución de tecnología celular del futuro con el fin de ofrecer a los usuarios mejores velocidades de navegación, mayor experiencia y calidad en el servicio. Con la estandarización de la 3GPP, la cual define que el ancho de banda debe estar entre los 1.4 MHz y los 20 MHz y debido a que la mayoría de operadores tienen asignaciones de espectro menores a 20 MHz en bloques contiguos o múltiples bandas en bloques de espectro no contiguos, se producen limitantes en el uso de una única portadora en LTE con un bloque de 20 MHz, limitantes que con la solución innovadora de *Carrier Aggregation* permitirá obtener mayores velocidades de navegación mediante la combinación de múltiples bandas de frecuencia. A continuación se relacionan algunos ejemplos de empresas y proveedores de terminales móviles que ya han implementado esta funcionalidad, que aunque es relativamente nueva tiene una fracción significativa en el mercado.

- El primer despliegue comercial de CA fue en 2013 en Corea del Sur, en donde la operadora SK Telecom utilizó la configuración de *Carrier Aggregation* empleando 3 bloques de espectro con el fin de aliviar uno de los grandes problemas en este país como es la congestión de red en zonas urbanas. SK Telecom con asignaciones de espectro en las bandas de 800 MHz, 1800 MHz y 2.1 GHz combinó con éxito 10 MHz de espectro sobre la banda de 800 MHz, 20 MHz de espectro sobre la banda de 1800 MHz y 10 MHz sobre los 2.1 GHz logrando una velocidad pico de descarga de 300 Mbps³⁵.
- En marzo de 2014, la compañía AT&T empezó a utilizar la funcionalidad de *Carrier Aggregation* en Chicago Estados Unidos y otros mercados con el fin de aumentar la capacidad y velocidades de LTE en su red. En el caso de Chicago, AT&T utilizó las bandas de 700 MHz y 2100 MHz en la banda AWS. La combinación de las dos bandas permitió producir 15 MHz de ancho de banda en descarga, aumentando las velocidades de descarga teóricas alrededor de los 110 Mbps³⁶.

³⁵ SAHOTA, Dawinderpal. SK Telecom develops LTE-A tri-band carrier aggregation technology. [En línea]. 2014. [2-nov-2015] Disponible en: <http://telecoms.com/215472/sk-telecom-develops-lte-a-tri-band-carrier-aggregation-technology/>

³⁶ GOLDSTEIN, Phil. AT&T lights up LTE Advanced carrier aggregation in Chicago, other markets. [En línea]. 2014. [13-nov-2015]. Disponible en: <http://www.fiercewireless.com/story/att-lights-lte-advanced-carrier-aggregation-chicago-other-markets/2014-03-07>

- En marzo de 2014, el operador Taiwán Mobile junto al proveedor tecnológico Nokia NSN (*Nokia Solutions and Networks*), iniciaron el despliegue de redes LTE multibanda en las que se incluía la implementación de la tecnología *Carrier Aggregation* y otras mejoras en las estaciones base, con el fin de aumentar el rendimiento y ancho de banda de la red³⁷. El operador se ha convertido en el único en ofrecer 30 MHz, el ancho de banda más alto en el mercado, permitiendo brindar altas velocidades de red para los usuarios más exigentes. El operador combina 20 MHz sobre la banda de 700 MHz con 10 MHz en la banda de 1800 MHz. Además de la combinación realizada, se logra obtener una excelente cobertura y un alto índice de penetración, dadas las características de propagación de la banda de 700 MHz.
- En diciembre de 2014, la operadora EE, compañía de comunicaciones móviles de Reino Unido, junto a *Qualcomm Technologies* y Huawei completaron con éxito pruebas de conectividad y velocidad con 3 portadoras en el enlace descendente y alcanzaron velocidades de descarga de hasta 410 Mbps. Las pruebas fueron realizadas utilizando un modem con procesador *Qualcomm Snapdragon 810*, el cual soporta *LTE-Advanced*, y la solución de infraestructura comercial de Huawei perteneciente al operador EE, agregando 20 MHz de espectro sobre la banda de 1800 MHz, 20 MHz en la banda de 2600 MHz y una tercera portadora de 15 MHz en la banda de 2600 MHz³⁸.
- En el 2015, Telstra, la compañía de telecomunicaciones australiana y junto a Ericsson, logran alcanzar altas velocidades de hasta 450 Mbps en el enlace descendente mediante la combinación de 3 portadoras de 20 MHz de ancho de banda cada una. La demostración combinó 20 MHz en la banda de 1800 MHz más dos portadoras cada una de 20 MHz en la banda de 2600 MHz. La velocidad alcanzada en la demostración se da luego de alcanzar 300 Mbps en pruebas realizadas el año 2013 en la cual se combinaron 20 MHz de la banda de 1800 MHz con 20 MHz en la banda de 2600MHz³⁹. La demostración incluyó descargas de contenidos de video y se llevó a cabo en la red comercial de Telstra. Se alcanzaron velocidades de 300 Mbps que permitieron a los usuarios descargar un archivo de 800 MB en aproximadamente 21 segundos. El operador además señaló la intención de combinar más portadoras pero esta vez con las frecuencias resultantes de la banda de 700 MHz, una vez que estos recursos del espectro estén disponibles luego del dividendo digital, resultante del apagón analógico de las señales de televisión⁴⁰.

³⁷ BORCHERT, Markus. Taiwan Mobile selects NSN as sole supplier for its LTE-Advanced network. [En línea]. 2014. [14-nov-2015]. Disponible en: <http://networks.nokia.com/de/news-events/press-room/press-releases/taiwan-mobile-selects-nsn-as-sole-supplier-for-its-lte-advanced-network>

³⁸ CARVILL, Jon. Qualcomm, EE and Huawei Successfully Complete LTE Category 9 Carrier Aggregation Interoperability Testing. [En línea]. 2014. [2-nov-2015] Disponible en: <https://www.qualcomm.com/news/releases/2014/12/22/qualcomm-ee-and-huawei-successfully-complete-lte-category-9-carrier>

³⁹ ERICSSON. Ericsson and Telstra achieve world's first 450Mbps in commercial LTE-A network demonstration. [En línea]. 2015. [2-nov-2015]. Disponible en: http://www.ericsson.com/news/140515-ericsson-and-telstra-achieve-worlds-first-450mbps-in-commercial-lte-a-network-demonstration_244099437_c

⁴⁰ PARKER, Tammy. Ericsson, Telstra demo 300 Mbps downlink via carrier aggregation. [En línea]. 2013. [2-nov-2015]. Disponible en: <http://www.fiercewireless.com/tech/story/ericsson-telstra-demo-300-mbps-downlink-carrier-aggregation/2013-12-07>

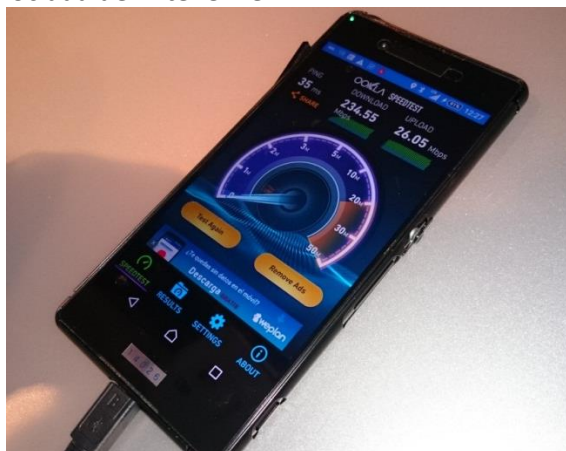
- En marzo de 2015, en Barcelona España, la compañía de telecomunicaciones Telefónica presentó una prueba de *LTE-Advanced* con *Carrier Aggregation* de 3 bandas (3 CA) sobre una red real utilizando equipamiento del proveedor de tecnología Ericsson. El operador utilizó todo su espectro disponible para combinar 3 portadoras (20 MHz en 2600 MHz + 20 MHz en 1800 MHz + 10 MHz en 800 MHz) y se alcanzaron velocidades de hasta 375 Mbps en bajada y 50 Mbps en el enlace ascendente en dos sitios en Barcelona. Los resultados se lograron con el equipo Samsung Galaxy Note 4, unos de los primeros dispositivos de categoría 9, capaz de soportar *LTE-Advanced* con *Carrier Aggregation* en 3 bandas. Telefónica está trabajando activamente con el fin de ofrecer LTE en la banda de 800 MHz, lo antes posible, una vez que las frecuencias estén disponibles, para ofrecer servicios avanzados de conectividad, brindar mayores velocidades de transmisión de datos, incrementar la capacidad por cliente y reducir la latencia (el tiempo de respuesta en la red) en comparación con otras redes⁴¹.
- En septiembre del 2015, el operador de comunicaciones Chileno Entel y en conjunto con el proveedor tecnológico Ericsson, realizaron las primeras pruebas en este país y también a nivel de Latinoamérica, haciendo uso de la funcionalidad de *Carrier Aggregation* en LTE Avanzado, en la cual se combinaron 20 MHz de la banda de 2600 MHz (banda B7) junto con 15 MHz en la banda de 700 MHz (banda B28), las cuales actualmente se están implementando. Se alcanzaron velocidades de bajada que superan los 200 Mbps, llegándose inclusive a experimentar velocidades hasta los 250 Mbps en algunos casos. Así mismo se logró obtener una excelente cobertura gracias a la fácil penetración que tiene la banda de 700 MHz en interiores. El servicio se espera que esté disponible un año después, una vez que la red sobre las frecuencias de la banda de los 700 MHz se encuentren funcionando. En cuanto a equipos compatibles, en la actualidad solo los Samsung Galaxy S6, S6 Edge y S6 Edge+ tienen compatibilidad con *LTE-Advanced Carrier Aggregation* (4G+)⁴². El resultado de las pruebas se ve reflejado en velocidades impresionantes sobre los 234 Mbps⁴³ en las cuales se utilizaron aplicaciones en línea que requerían altas tasas de transferencia de datos, como por ejemplo, descarga de videos 4k, aplicaciones de realidad virtual y juegos en línea. En la Figura 17 se muestran los resultados de las pruebas de conectividad y velocidad realizadas en la demostración mediante el aplicativo *Speedtest*.
- Los proveedores de terminales móviles Apple, Samsung, LG y HTC han lanzado al mercado dispositivos con la funcionalidad de *Carrier Aggregation*, tal es el caso de los equipos Samsung Galaxy S4, Samsung Galaxy S6, Note 3, LG Pro2, LG G3, HTC One M8 y el Apple Iphone 6 y 6 Plus.

⁴¹ TELEFÓNICA. Telefónica muestra velocidades de hasta 375 Mbps en su red comercial LTE-Advanced en el Mobile World Congress. [En línea]. 2015. [10-nov-2015]. Disponible en: <https://www.telefonica.com.mx/prensa/2015/marzo/Telefonica-muestra-velocidades-de-hasta-375-mbps-en-su-red-comercial-LTE-Advanced-en-el-Mobile-World-Congress>

⁴² MUNIZAGA, Jonathan. Entel realizó la primera prueba LTE Advanced Carrier Aggregation en Chile y LATAM. [En línea]. 2015. [2-nov-2015]. Disponible en: <https://www.wayerless.com/2015/09/entel-realizo-la-primera-prueba-lte-advanced-carrier-aggregation-en-chile-y-latam/>

⁴³ MERA, Roberto. Entel Chile comienza las primeras pruebas de LTE-A Carrier Aggregation en Latinoamérica. [En línea]. 2015. [2-nov-2015]. Disponible en: <http://pisapapeles.net/entel-chile-comienza-las-primeras-pruebas-de-lte-a-carrier-aggregation-en-latinoamerica/>

Figura 17. Pruebas de velocidad de Entel Chile



Fuente: MERA, Roberto. Entel Chile comienza las primeras pruebas de LTE-A Carrier Aggregation en Latinoamérica.

En el Cuadro 20, se presenta de forma resumida los diferentes operadores nombrados anteriormente que han implementado la funcionalidad de *Carrier Aggregation*, relacionando la cantidad de ancho de banda utilizado en cada combinación junto con sus respectivas bandas, así como también el ancho de banda total obtenido y la velocidad pico de descarga alcanzada.

Cuadro 20. Relación de velocidades de descarga teóricas junto con los bloques de espectro utilizados

País	Operador	Bloques de espectro combinados en cada enlace	Ancho de banda obtenido en la combinación	Velocidad pico de descarga alcanzada
Corea del Sur	SK Telecom	10 MHz + 20 MHz+ 10 MHz. Bandas 800 MHz /1800 MHz / 2.1 GHz	40 MHz	300 Mbps
Corea del Sur	SK Telecom	20 MHz+ 10 MHz. Bandas 800 MHz /1800 MHz	30 MHz	225 Mbps
Estados Unidos	AT&T	700 MHz y 2100 MHz	15 MHz	110 Mbps
Taiwán	Taiwán Mobile	20 MHz + 10 MHz. Bandas 700 MHz /1800 MHz	30 MHz	225 Mbps
Taiwán	Chunghwa Telecom	15 MHz + 10 MHz. Bandas 1800 MHz / 900 MHz	25 MHz	180 Mbps
Reino Unido	EE	20 MHz + 20 MHz + 15 MHz. Bandas 1800 MHz / 2600 MHz / 2600 MHz	55 MHz	410 Mbps
Reino Unido	EE	20 MHz + 20 MHz. Bandas 1800 MHz / 2600 MHz	40 MHz	300 Mbps
Australia	Telstra	20 MHz + 20 MHz + 20 MHz. Bandas 1800 MHz/ 2600 MHz / 2600 MHz	60 MHz	450 Mbps

Fuente: Los autores.

Cuadro 20. Relación de velocidades de descarga teóricas junto con los bloques de espectro utilizados (Continuación)

País	Operador	Bloques de espectro combinados en cada enlace	Ancho de banda obtenido en la combinación	Velocidad pico de descarga alcanzada
Australia	Telstra	20 MHz + 20 MHz. Bandas 1800 MHz / 2600 MHz	40 MHz	300 Mbps
España	Telefónica	20 MHz + 20 MHz +10 MHz. Bandas 2600 MHz /1800 MHz / 800 MHz	50 MHz	375 Mbps
España	Vodafone	20 MHz + 20 MHz. Bandas 1800 MHz / 2600 MHz	40 MHz	300 Mbps
Chile	Entel	15 MHz + 20 MHz. Bandas 700 MHz / 2600 MHz	35 MHz	250 Mbps
Francia	SFR	10 MHz + 10 MHz. Bandas 800 MHz / 2600 MHz	20 MHz	174 Mbps
Japón	NTT Docomo	15 MHz + 20 MHz. Bandas 800 MHz / 1.7 GHz	35 MHz	262.5 Mbps

Fuente: Los autores.

En un reporte de la evolución de LTE de julio de 2015, la GSA (*Global Mobile Supplier Association*)⁴⁴, indicó que se tenían hasta el momento 88 redes celulares diferentes en 45 países, en donde se han realizados lanzamientos comerciales de la funcionalidad de *Carrier Aggregation*, lo cual ha permitido a los operadores aumentar las velocidades de navegación, las capacidades y experiencia de navegación al usuario, principales preocupaciones de cualquier compañía en la actualidad. Dentro de estas redes de CA, algunas son LTE Categoría 4 alcanzando los 150 Mbps y otras Categoría 9, las cuales permiten alcanzar 450 Mbps⁴⁵. En el Cuadro 21 se resumen las bandas, frecuencias de operación y el ancho de banda obtenido de la combinación de múltiples portadoras en *Carrier Aggregation*, que han implementado algunos de los operadores de distintos países del mundo, lanzamientos que se han realizado entre el 2014 y el 2015.

Cuadro 21. Combinaciones de Carrier Aggregation implementadas en el mundo

País	Operador	F (MHz)	Banda	Modo Duplex	Combinación de CA implementada
Marruecos	Maroc Telecom	800	20	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_20A).
	Maroc Telecom	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_20A).

Fuente: GSA. Evolution to LTE report.

⁴⁴ GSA. Evolution to LTE report. 4G market and technology update. [En línea]. 2015. [14-ene-2016]. Disponible en: http://www.malaysianwireless.com/wp-content/uploads/2015/07/GSA-Evolution_to_LTE_report_21-July-2015.pdf

⁴⁵ MOORHEAD, Patrick. Carrier Aggregation: An Opportunity For Operators And Handset OEMs, But Is The U.S. Behind. [En línea]. 2015. [13-nov-2015]. Disponible en: <http://www.forbes.com/sites/patrickmoorhead/2015/07/27/carrier-aggregation-an-opportunity-for-operators-and-handset-oems-but-is-the-u-s-behind/>

Cuadro 21. Combinaciones de Carrier Aggregation implementadas en el mundo (Continuación)

País	Operador	F (MHz)	Banda	Modo Duplex	Combinación de CA implementada
Canadá	Bell	700 b	12	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_4A_7A_12A).
	Bell	1700	4	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_4A_7A). Carrier aggregation de 40 MHz (CA_4A_7A_12A).
	Bell	1900	2	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_2A_7A).
	Bell	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_2A_7A). Carrier aggregation de 30 MHz (CA_4A_7A). Carrier aggregation de 40 MHz (CA_4A_7A_12A).
	Rogers	700 bc	17	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_4A_17A). (Cat.4)
	Rogers	1700	4	FDD	15 MHz for Carrier aggregation de 20 MHz (CA_4A_17A). (Cat.4) 10 MHz for Carrier aggregation de 30 MHz (CA_4A_7A).
	Rogers	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_4A_7A).
Estados Unidos	AT&T	700 bc	17	FDD	Carrier aggregation de 15 MHz (CA_4A_17A). (Cat.4)
	AT&T	1700 a b c	4	FDD	Carrier aggregation de 15 MHz (CA_4A_17A). (Cat.4)
	AT&T	1700 d	4	FDD	Carrier aggregation de 15 MHz (CA_4A_17A). (Cat.4)
	AT&T	1700 e	4	FDD	Carrier aggregation de 15 MHz (CA_4A_17A). (Cat.4)
	Verizon	700 c	13	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_4A_13A). (Cat.4)
	Verizon	1700 f	4	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_4A_13A). (Cat.4)
Hong Kong	csl	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
	csl	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
	SmarTone	900	8	FDD	Carrier aggregation de 15 MHz (CA_3A_8A).
	SmarTone	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 15 MHz (CA_3A_8A).
Indonesia	Smartfren	2300	40	TDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_5A_40A).
	Smartfren	850	5	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_5A_40A).
Japón	au	700	28	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_18A_28A).
	au	800	18	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_1A_18A). Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_18A_28A).
	au	2100	1	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_1A_18A). Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_18A_28A).
	NTT Docomo	800	19	FDD	Carrier aggregation de 25 MHz (CA_1A_19A). Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_19A). Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_19A_21A).
	NTT Docomo	1500	21	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_1A_21A). Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_19A_21A).

Fuente: GSA. Evolution to LTE report.

Cuadro 21. Combinaciones de Carrier Aggregation implementadas en el mundo (Continuación)

País	Operador	F (MHz)	Banda	Modo Duplex	Combinación de CA implementada
Japón	NTT Docomo	1800	9	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_19A) Carrier aggregation de 35 MHz (CA_1A_3A).
	NTT Docomo	2100	1	FDD	Carrier aggregation de 25 MHz (CA_1A_19A). Carrier aggregation de 30 MHz (CA_1A_21A). Carrier aggregation de 35 MHz (CA_1A_3A). Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_19A_21A).
	SoftBank	900	8	FDD	Carrier aggregation de 25 MHz (CA_1A_8A).
	SoftBank	2100	1	FDD	Carrier aggregation de 25 MHz (CA_1A_8A).
	Maxis	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_7A)
Malasia	Maxis	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_7A)
Maldivas	Dhiraagu	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
	Dhiraagu	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
Singapur	M1	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
	M1	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
	Singtel	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
	Singtel	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
	StarHub	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
	StarHub	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
Corea del Sur	KT	900	8	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_3A_8A). (Cat.4) Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_8A).
	KT	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_3A_8A). (Cat.4) Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_8A).
	LG U+	850	5	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_1A_5A). (Cat.4) Carrier aggregation de 30 MHz (CA_5A_7A). Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_5A_7A).
	LG U+	2100	1	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_1A_5A). (Cat.4) Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_5A_7A).
	LG U+	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_5A_7A). Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_5A_7A).
	SK Telecom	850	5	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_5A). Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_3A_5A).
	SK Telecom	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_5A). Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_3A_5A).
	SK Telecom	2100	1	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_1A_3A_5A).
Taiwán	Chunghwa Telecom	900	8	FDD	Carrier aggregation de 25 MHz (CA_3A_8A).
	Chunghwa Telecom	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 25 MHz (CA_3A_8A).

Fuente: GSA. Evolution to LTE report.

Cuadro 21. Combinaciones de Carrier Aggregation implementadas en el mundo (Continuación)

País	Operador	F (MHz)	Banda	Modo Duplex	Combinación de CA implementada
Taiwán	Taiwán Mobile	700	28	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_28A).
	Taiwán Mobile	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_28A).
Kuwait	Ooredoo	800	20	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_3A_20A).
	Ooredoo	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_3A_20A).
Catar	Ooredoo	800	20	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_7A_20A). Carrier aggregation de 50 MHz (CA_3A_7A_20A).
	Ooredoo	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 50 MHz (CA_3A_7A_20A).
	Ooredoo	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_7A_20A). Carrier aggregation de 50 MHz (CA_3A_7A_20A).
	Vodafone	800	20	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_3A_20A). (Cat.4) Carrier aggregation de 50 MHz (CA_3A_7A_20A).
	Vodafone	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_3A_20A). (Cat.4) Carrier aggregation de 50 MHz (CA_3A_7A_20A).
	Vodafone	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 50 MHz (CA_3A_7A_20A).
Arabia Saudita	Zain	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_1A_3A).
	Zain	2100	1	FDD	Carrier aggregation de 20 MHz (CA_1A_3A).
Emiratos Árabes Unidos	Du	800	20	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_20A).
	Du	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_20A).
	Etisalat	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
	Etisalat	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_7A).
Australia	Optus	700	28	FDD	Carrier aggregation de 25 MHz (CA_3A_28A) (Area metropolitana) Carrier aggregation de 30 MHz (CA_7A_28A) (area regional)
	Optus	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 25 MHz (CA_3A_28A) (area metropolitana) Carrier aggregation de 55 MHz (CA_3A_40C) (area metropolitana).
	Optus	2300	40	TDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_40C) (area metropolitana). Carrier aggregation de 55 MHz (CA_3A_40C) (area metropolitana).
	Optus	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_7A_28A) (area regional)
	Telstra	700	28	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_28A). Carrier aggregation de 80 MHz (CA_3A_7C_28A).
	Telstra	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 40 MHz (CA_3A_28A). Carrier aggregation de 80 MHz (CA_3A_7C_28A).
	Telstra	2600	7	FDD	Carrier aggregation de 80 MHz (CA_3A_7C_28A).
	Vodafone	850	5	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_5A).
	Vodafone	1800	3	FDD	Carrier aggregation de 30 MHz (CA_3A_5A).

Fuente: GSA. Evolution to LTE report.

6. DESARROLLO DEL PROYECTO

En este capítulo se detallará la asignación actual del espectro radioeléctrico en Colombia para los operadores móviles y luego se realizará un análisis de las ventajas y desventajas de implementar la funcionalidad de *Carrier Aggregation* para los principales operadores móviles en función de las frecuencias que tienen asignadas actualmente.

6.1 ASIGNACIÓN ACTUAL DEL ESPECTRO EN COLOMBIA

En Colombia, la telefonía móvil inicio con la expedición y reglamentación de la ley 37 de 1993, a través de la cual se reguló la prestación de servicios de telefonía móvil celular TMC y se le adjudicaron al Ministerio de las Telecomunicaciones responsabilidades asociadas a la planeación, asignación y administración del espectro radioeléctrico. De esta forma, un año más tarde se asigna inicialmente 25 MHz de espectro radioeléctrico a cada uno de los operadores de telefonía móvil (Hoy Claro y Movistar) en la banda de 800 MHz, las cuales les permitieron iniciar con la construcción de redes de amplia cobertura y ofrecer servicios de voz. La asignación de estos 50 MHz (25 MHz a cada operador) se realizó de la siguiente manera:

- Mediante licitación pública Nro. 45 de 1993 el Ministerio de Telecomunicaciones, hoy Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, otorgó al operador Colombia Telecomunicaciones (hoy Movistar) los permisos para uso de las bandas de frecuencia de 835.020 MHz a 844.980 MHz y 846.510 MHz a 848.970 MHz para transmisión desde la estación móvil hacia la estación base y de 880.020 MHz a 889.980 MHz y 891.510 MHz a 893.970 MHz para transmisión de señales desde la estación base a la estación móvil.
- Mediante licitación pública Nro. 46 de 1993 el Ministerio de Telecomunicaciones otorgó al operador Comunicación Celular SA Comcel SA los permisos para uso de las bandas de frecuencia de 824.040 MHz a 834.990 MHz y 845.010 MHz a 846,480 MHz para transmisión desde la estación móvil hacia la estación base y de 869.040 MHz a 879.990 MHz y 890.010 MHz a 891,480 MHz para transmisión de señales desde la estación base a la estación móvil.

A los mismos operadores, entre el último trimestre del 2004 y primero del 2005, como consecuencia de la expedición del decreto 4234 de 2004, el cual reglamentó que el espectro radio eléctrico máximo asignado a cada operador para la prestación de servicios móviles sería de 40 MHz por operador, otorgó 15 MHz de espectro adicional a cada operador en la banda de 1900 MHz, las cuales permitieron el desarrollo y despliegue de redes de tercera generación para la prestación de servicios de voz y datos de mejor calidad. Estas asignaciones se realizaron de la siguiente forma:

- Mediante resolución 2720 de 2004 de Ministerio de Comunicaciones⁴⁶, se atribuyó a la empresa de Comunicación Celular SA Comcel SA las bandas de frecuencias de 1877.5 a 1885 MHz y de 1957.5 a 1965 MHz con un total de 15 MHz.
- Mediante la resolución 508 de 2005⁴⁷ se atribuyeron 15 MHz de espectro a la empresa de telefonía móvil Colombia Telecomunicaciones SA (Movistar) en las bandas de frecuencias de 1870 a 1877.5 MHz y de 1950 a 1957,5 MHz para su explotación y uso durante la vigencia de las concesiones, en la prestación del Servicio de Telefonía Móvil Celular.

En el año 2003 ingresa al mercado un tercer operador (Colombia Móvil – actual TIGO), al cual le fueron asignados 30 MHz de espectro en la banda de 1900 MHz. Posteriormente en el 2008, bajo el decreto 4234 de 2004 se asignan 10 MHz de espectro adicional al mismo operador sobre la misma banda de frecuencias, resultando en un total de 40 MHz de ancho de banda para el despliegue y operación sobre la banda de 1900 MHz. Las bandas de frecuencias entregadas se encuentran en los rangos 1890-1910 MHz y 1970 MHz -1990 MHz.

Hasta el año 2009, la asignación de espectro para los operadores Colombia Móvil –Actual Tigo, Colombia Telecomunicaciones SA – actual Movistar y Comunicación Celular SA- Actual Claro era de 40 MHz para cada operador, según se había reglamentado con el decreto 4234 de 2004. Sin embargo, este fue derogado posteriormente por el Ministerio de Telecomunicaciones con el decreto 4722 de 2009⁴⁸, el cual reguló el tope máximo de espectro radioeléctrico asignado por operador a 55 MHz, ayudando a satisfacer los servicios de telecomunicaciones de tercera generación de los 3 operadores de comunicaciones móviles existentes hasta este momento. Este tope máximo incluía tanto el espectro asignado inicialmente en las respectivas concesiones o títulos habilitantes, así como sus adiciones mediante permisos de espectro otorgados por el Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

Posteriormente se realizó una asignación de 20 MHz adicionales (10 MHz para Comunicación Celular SA- Comcel y 10 MHz para Colombia Móvil - Tigo), ambos en la banda de 1900 MHz de la siguiente forma:

⁴⁶ COLOMBIA. MINISTERIO DE TELECOMUNICACIONES. Resolución 2720 de 2004 (30 de diciembre de 2004) Por la cual se atribuyen y asignan unas bandas de frecuencias radioeléctricas para la operación y prestación del Servicio de Telefonía Móvil Celular y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá., 2005.

⁴⁷ COLOMBIA, MINISTERIO DE TELECOMUNICACIONES. Resolución 508 de 2005 (28 de marzo de 2005). Bogotá., 2005

⁴⁸ COLOMBIA. MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS TELECOMUNICACIONES. Decreto 4722 de 2009 (2 de diciembre de 2009). Por el cual se establecen los criterios para el otorgamiento de espectro radioeléctrico en la banda de 1850 MHz a 1990 MHz para el servicio móvil terrestre y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá., 2009.

- Mediante la Resolución 443 del 16 de abril de 2010⁴⁹, el Ministerio TIC otorgó a Colombia Móvil permiso hasta por tres (3) años para el acceso, uso y explotación del espectro radioeléctrico en la bandas 1855 a 1860 MHz y de 1935 a 1940 MHz, para un total de 10 MHz.
- Mediante la resolución 3081 del 24 de diciembre de 2009 se asignó espectro adicional al operador Comunicación Celular S.A.-Comcel S.A en las bandas 1852.5 a 1855 MHz y 1932.5 a 1935 MHz, 1860 a 1862.5 MHz y 1940 a 1942.5 MHz, para un total de 10 MHz.

En junio de 2010, se llevó a cabo una subasta para asignación de espectro en la banda de 2,5 GHz para servicios móviles de cuarta generación LTE y que tuvo como ganador al operador UNE con 10 bloques de 5 MHz para un total de 50 MHz asignados en la banda de frecuencias de 2500 MHz a 2525 MHz y 2620 a 2645, bajo la resolución 1177 del 9 de julio de 2010 modificada por las resoluciones 1280 y 1888 del 21 de septiembre de 2010.

En agosto de 2011 se llevó a cabo una subasta para asignación de espectro en la banda de 1900 MHz en la que únicamente participaron Colombia Móvil - Tigo, Comunicación Celular SA – Comcel y Colombia Telecomunicaciones SA (Movistar) y debido a los topes impuestos por la regulación del momento (máximo 55 MHz de asignación de espectro radioeléctrico), Comcel y Tigo adquieren 5 MHz cada uno y Movistar adquiere 15 MHz en la banda de 1900 (resolución 1157 de junio de 2011), espectro distribuido de acuerdo a la canalización de la banda de 1900 MHz, Figura 18⁵⁰, mediante la asignación de frecuencias de la siguiente forma:

- 5 MHz en la parte superior de la banda D y 10 MHz completos en la banda E, para un total de 15 MHz adquiridos por Colombia Telecomunicaciones SA (Movistar) y distribuidos en las bandas de frecuencias de 1885 a 1890 y de 1965 a 1970 (Banda E) y de 1867,5 a 1870 y de 1947,5 a 1950 MHz.
- 5 MHz en la parte inferior de la banda A adquiridos por Colombia Móvil- Tigo asignados en las bandas de frecuencias de 1850 a 1852.5 MHz y de 1930 a 1932.5 MHz. 5 MHz en la parte superior de la banda A adquiridos por Comunicación Celular –Comcel asignados en las bandas de frecuencias de 1862.5 a 1865 MHz y de 1942.5 a 1945 MHz.

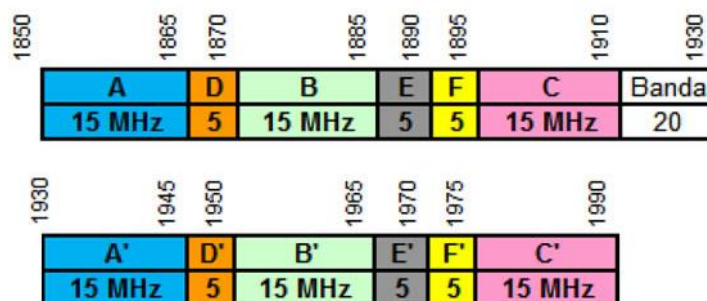
En junio de 2013, Claro (Comunicación Celular SA – Comcel), Movistar, ETB - Tigo, Avantel y Directv resultaron adjudicatarios de los bloques de espectro en la banda de 2500 MHz y en AWS

⁴⁹ COLOMBIA MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS TELECOMUNICACIONES. Resolución 443 de 2010 (16 de abril de 2010). Diario Oficial. Bogotá., 2013.

⁵⁰ROJAS, Orlando. Terminó la subasta por 25 MHz de espectro en 1900 MHz. [En línea].2015. [2-nov-2015] Disponible en internet: <http://www.evaluamos.com/2011/internal.php?load=detail&id=12595>

(Advanced Wireless Service), permisos otorgados en el proceso de subasta establecido en la resolución 449 de 2013⁵¹ y sus modificaciones, los resultados se muestran en el Cuadro 22.

Figura 18. Canalización de la banda de 1900 MHz en Colombia



Fuente: Rojas, Orlando. Terminó la subasta por 25 MHz de espectro en 1900 MHz.

Cuadro 22. Participantes que resultaron adjudicados y sus respectivos bloques de espectro

Bloque	Banda de Frecuencia	Total	Adjudicatario
a-AWS	1710 a 1725 MHz pareada con 2110 a 2125 MHz	30 MHz	Avantel S.A.
b-AWS	1725 a 1740 MHz pareada con 2125 a 2140 MHz	30 MHz	Colombia Telecomunicaciones SA (Movistar)
c-AWS	1740 a 1755 MHz pareada con 2140 a 2155 MHz	30 MHz	Union Temporal Colombia Movil ETB
2500 MHz	2525 a 2540 MHz pareada con 2645 a 2660 MHz	30 MHz	Comunicación Celular SA – Comcel
2500 MHz	2555 a 2570 MHz pareada con 2675 a 2690 MHz	30 MHz	Directv Colombia LTDA
2500 MHz	2575 a 2615 MHz	40 MHz	Directv Colombia LTDA

Fuente: Los autores.

Finalmente y dada la duración establecida para las licencias de espectro en Colombia, algunas de estas se vencieron de nuevo entre 2013 y 2014, por lo que hacía el año 2014, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones mediante resolución 598 renueva los permisos para uso del espectro radioeléctrico otorgado a Comcel SA en todo el territorio nacional en las bandas de frecuencia 824.040 MHz a 834.990 MHz, 845.010 MHz a 846,480 MHz, 869.040 MHz a 879.990 MHz, 890.010 MHz a 891,480 MHz, 1877.5 a 1885 MHz y de 1957.5 a 1965 MHz desde el 29 de marzo de 2014 hasta el 28 de marzo de 2024⁵². De la misma forma sucede con el operador

⁵¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS TELECOMUNICACIONES.

Resolución 449 de 2013 (11 de marzo de 2013) Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para otorgar permisos para el uso de hasta 255 MHz de espectro en las bandas de 1850 a 1990 MHz, 1710 a 1755 MHz pareada con 2110 a 2155 MHz y 2500 a 2690 MHz.... Diario Oficial. Bogotá., 2013.

⁵² COLOMBIA. MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES. Resolución 598 de 2014 (27 de marzo de 2014). Por medio de la cual se renueva un permiso para uso del espectro radioeléctrico a Comunicación Celular SA Comcel SA. Diario Oficial. Bogotá., 2014.

Colombia Telecomunicaciones SA (Movistar) que con resolución 597 de 2014 se le renueva permiso para uso del espectro en las bandas 835.020 MHz a 844.980 MHz, 846.510 MHz a 848.970 MHz, 880.020 MHz a 889.980 MHz, 891.510 MHz a 893.970 MHz, 1870 a 1877.5 MHz y de 1950 a 1957,5 MHz para su explotación y uso en la prestación del Servicio de Telefonía Móvil Celular hasta el 28 de marzo de 2024⁵³, asignación de frecuencias que se realizó siguiendo la tendencia latinoamericana a través del modelo de título habilitante para tener permisos de uso del espectro, en lugar del esquema de concesión o permisos de explotación utilizado en décadas anteriores⁵⁴.

A partir de los procesos de asignación de frecuencias del espectro radioeléctrico descritos anteriormente y según los toques reglamentados en el decreto 2980 de 2011 consistentes en 30 MHz de espectro en las bandas bajas (frecuencias entre 698 MHz y 960 MHz) y de 85 MHz en las bandas altas (frecuencias entre 1710 MHz y 2690 MHz), se muestra la repartición del espectro actual en la Figura 19⁵⁵. De la figura se puede concluir que los operadores Claro y Movistar están cercanas de alcanzar el tope de 30 MHz en las bandas bajas con 25 MHz cada uno en 850 MHz y la fusión Tigo – UNE sobrepasa el tope en bandas altas con 50 MHz adicionales a los 85 MHz reglamentados. Esto como consecuencia de la reciente fusión entre los operadores anteriores autorizada por la Superintendencia de Industria y Comercio mediante resolución 24527 del 15 de abril de 2014⁵⁶, la cual le otorgó al nuevo operador un tiempo límite para deshacerse del espectro que excede el tope de espacio radioeléctrico en bandas altas.

La distribución específica sobre las bandas de frecuencias asignadas a cada operador en 850 MHz, 1900 MHz, AWS y 2500 MHz, relacionada anteriormente, se muestra en la Figura 20.

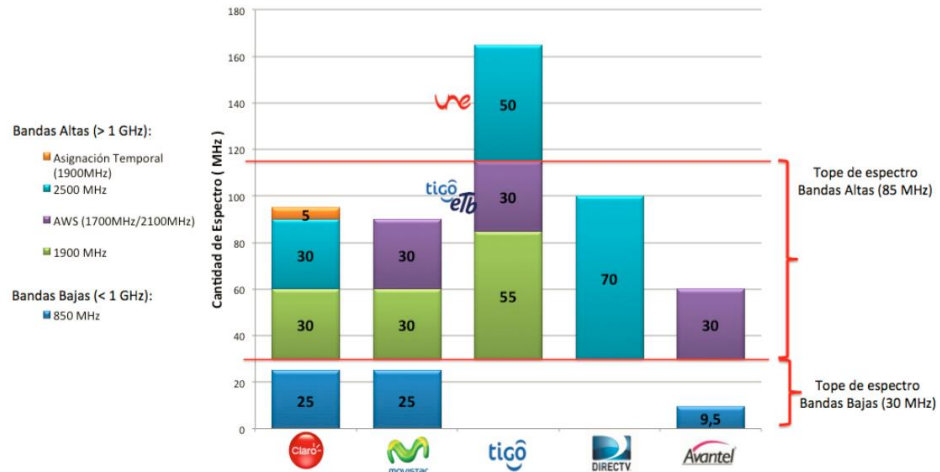
⁵³ COLOMBIA. MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES. Resolución 597 de 2014 (27 de marzo de 2014). Por medio de la cual se renueva un permiso para uso del espectro radioeléctrico a Colombia Telecomunicaciones S.A ESP. Diario Oficial. Bogotá., 2014.

⁵⁴ CASTRO, Felipe. Eficiencia económica de la renovación de las licencias de telefonía móvil en Colombia. 2015. Bogotá: Fedesarrollo Centro de Investigación económico y social. 2015. 29 p.

⁵⁵ AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. Proceso de selección objetiva para asignación de espectro radioeléctrico en las bandas 700 MHz (Dividendo digital), 900 MHz, 1900 MHz y 2500 MHz para servicios móviles terrestres. Documento de consulta pública. Bogotá. 2015. 22 p.

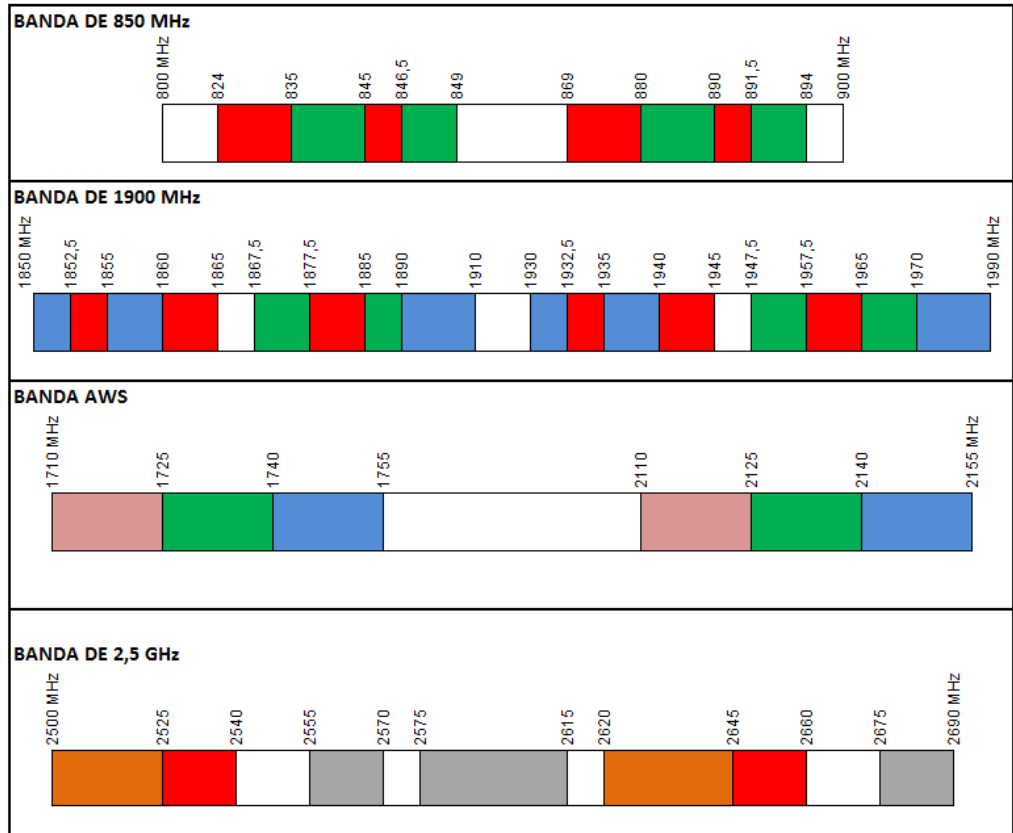
⁵⁶ COLOMBIA. SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO. Resolución 24527 de 2014 (15 de abril de 2014) Por la cual se condiciona una operación de integración. Diario Oficial. Bogotá. 2014.

Figura 19. Asignación actual del espectro



Fuente: ANE. Proceso de selección objetiva para asignación de espectro.

Figura 20. Distribución de frecuencias actual en 850 MHz, 1900 MHz, AWS y 2500 MHz



Fuente: Los autores.

6.2 ANÁLISIS DE CARRIER AGGREGATION PARA LOS PRINCIPALES OPERADORES MÓVILES EN COLOMBIA

De acuerdo a la distribución de bandas de frecuencias en el espectro radioeléctrico colombiano tal como se representó en la Figura 20, sobre el Cuadro 23 se relaciona la cantidad de espectro y sus respectivas bandas específicas que poseen los principales operadores móviles en Colombia; adicional se relacionan las bandas de frecuencia de los operadores Avantel, Une y DirecTV. En este cuadro se observa que la distribución de espectro radioeléctrico para los principales operadores móviles en Colombia (Claro, Movistar y Tigo) se concentran en las bandas 2, 4, 5 y 7.

Cuadro 23. Bandas de frecuencia asignadas a los operadores móviles en Colombia

OPERADOR	BANDA	FRECUENCIAS	ANCHO DE BANDA TOTAL
Claro	5	UL: 824 MHz – 835 MHz	UL: 12.5 MHz DL: 12.5 MHz
		UL: 845 MHz – 846.5 MHz	
		DL: 869 MHz – 880 MHz	
		DL: 890 MHz – 891.5 MHz	
Movistar	5	UL: 835 MHz – 845 MHz	UL: 12.5 MHz DL: 12.5 MHz
		UL: 846.5 MHz – 849 MHz	
		DL: 880 MHz – 890 MHz	
		DL: 891.5 MHz – 894 MHz	
Claro	2	UL: 1852.5 MHz – 1855 MHz	UL: 15 MHz DL: 15 MHz
		UL: 1860 MHz – 1865 MHz	
		UL: 1877.5 MHz – 1885 MHz	
		DL: 1932.5 MHz – 1935 MHz	
		DL: 1940 MHz – 1945 MHz	
		DL: 1957.5 MHz – 1965 MHz	
Movistar	2	UL: 1867.5 MHz – 1877.5 MHz	UL: 15 MHz DL: 15 MHz
		UL: 1885 MHz – 1890 MHz	
		DL: 1947.5 MHz – 1957.5 MHz	
		DL: 1965 MHz – 1970 MHz	
Tigo	2	UL: 1850 MHz – 1852.5 MHz	UL: 27.5 MHz DL: 27.5 MHz
		UL: 1855 MHz – 1860 MHz	
		UL: 1890 MHz – 1910 MHz	
		DL: 1930 MHz – 1932.5 MHz	
		DL: 1935 MHz – 1940 MHz	
		DL: 1970 MHz – 1990 MHz	
Avantel	4 (Banda AWS)	UL: 1710 MHz – 1725 MHz DL: 2110 MHz – 2125 MHz	UL: 15 MHz DL: 15 MHz
Movistar	4 (Banda AWS)	UL: 1725 MHz – 1740 MHz	UL: 15 MHz
		DL: 2125 MHz – 2140 MHz	DL: 15 MHz
Tigo	4 (Banda AWS)	UL: 1740 MHz – 1755 MHz	UL: 15 MHz
		DL: 2140 MHz – 2155 MHz	DL: 15 MHz
UNE	7	UL: 2500 MHz – 2525 MHz	UL: 25 MHz
		DL: 2620 MHz – 2645 MHz	DL: 25 MHz
Claro	7	UL: 2525 MHz – 2540 MHz	UL: 15 MHz
		DL: 2645 MHz – 2660 MHz	DL: 15 MHz

Fuente: Los autores.

Cuadro 23. Bandas de frecuencia asignadas a los operadores móviles en Colombia (Continuación)

OPERADOR	BANDA	FRECUENCIAS	ANCHO DE BANDA TOTAL
DirecTV	7	UL: 2555 MHz – 2570 MHz	UL: 15 MHz
		DL: 2675 MHz - 2690 MHz	DL: 15 MHz
	38	2575 MHz - 2615 MHz	BW: 40 MHz

Fuente: Los autores.

Con base en las bandas de frecuencias 2, 4, 5 y 7 que se encuentran asignadas a los principales operadores en Colombia y teniendo en cuenta los estándares recomendados por la 3GPP (TS 136 101 y TS 136 104) para cada una de las combinaciones de *Carrier Aggregation*, se presenta de forma resumida las combinaciones de bandas en el Cuadro 24, Cuadro 25 y Cuadro 26, tomados a partir del *release* 12 (v12.9.0) de la normatividad 3GPP, en los escenarios de inter-banda para dos bandas, inter-banda para tres bandas e intra-banda no contigua con dos sub-bloques respectivamente.

Cuadro 24. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con dos bandas

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Bandas	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Máximo BW agregado	Combinación de BW
CA_2A-4A	CA_2A-4A	2	SI	SI	SI	SI	SI	SI	40	0
		4			SI	SI	SI	SI		
		2			SI	SI			20	1
		4			SI	SI				
		2			SI	SI	SI	SI	40	2
		4			SI	SI	SI	SI		
CA_2A-5A	CA_2A-5A	2			SI	SI	SI	SI	30	0
		5			SI	SI				
CA_4A-5A	CA_4A-5A	4			SI	SI			20	0
		5			SI	SI				
		4			SI	SI	SI	SI	30	1
		5			SI	SI				
CA_5A-7A	CA_5A-7A	5	SI	SI	SI	SI			30	0
		7				SI	SI	SI		

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 25. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para inter-banda con tres bandas

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Banda	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	Máximo BW agregado
CA_2A-4A -5A	-	2			SI	SI	SI	SI	50
		4			SI	SI	SI	SI	
		5			SI	SI			

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Cuadro 26. Configuraciones y combinación de ancho de banda definidos para intra-banda no contigua con dos sub-bloques

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	Componentes de Carrier para aumentar la frecuencia de la portadora		Máximo BW agregado en MHz
		BW de canal permitidos para agregación de portadora en MHz	BW de canal permitidos para agregación de portadora en MHz	
CA_2A-2A	-	5,10,15,20	5,10,15,20	40

Fuente: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0

Con base a la información anterior, a continuación se explicarán cada uno de los posibles escenarios en los cuales los principales operadores móviles en Colombia podrían utilizar la funcionalidad de *Carrier Aggregation* para realizar distintas combinaciones de sus señales portadoras. Estos escenarios servirán de base para el desarrollo del próximo capítulo con el fin de realizar una recomendación a los operadores, de acuerdo a las posibles combinaciones que estos podrían implementar, lo cual resultaría en una mejora significativa en el rendimiento de datos, en el ofrecimiento de mejores capacidades y en una mejor experiencia de navegación al cliente, lo anterior sustentado con base en la revisión de los casos de estudio de varios operadores en el mundo que han implementado esta funcionalidad y que han obtenido altas velocidades en la descarga de información y mejor cobertura.

6.2.1 Claro -Comunicación Celular S.A. Actualmente, el operador Claro Comunicación Celular SA – Comcel, tiene asignados 25 MHz de espectro radioeléctrico en la banda 5, 30 MHz en la banda 2 y 30 MHz en la banda 7, como se muestra en el Cuadro 27. Acorde con los topes reglamentados que se estipulan en el decreto 2980 de 2011 consistentes en 30 MHz de espectro en las bandas bajas (frecuencias entre 698 MHz y 960 MHz) y de 85 MHz en las bandas altas (frecuencias entre 1710 MHz y 2690 MHz), el operador Claro no tendría que realizar devolución de espectro dado que no sobrepasa los topes permitidos, por lo cual se podrían presentar los siguientes escenarios ante una eventual implementación de *Carrier Aggregation* por parte del operador móvil.

Cuadro 27. Distribución de espectro para el operador Claro

BANDA	FRECUENCIAS	ANCHO DE BANDA TOTAL POR BLOQUE
5	UL1: 824 MHz– 835 MHz	UL1: 11 MHz
	UL2: 845 MHz – 846.5 MHz	UL2: 1.5 MHz
	DL1: 869 MHz - 880 MHz	DL1: 11 MHz
	DL2: 890 MHz – 891.5 MHz	DL2: 1.5 MHz
2	UL1: 1852.5 MHz – 1855 MHz	UL1: 2.5 MHz
	UL2: 1860 MHz – 1865 MHz	UL2: 5 MHz
	UL3: 1877.5 MHz – 1885 MHz	UL3: 7.5 MHz
	DL1: 1932.5 MHz – 1935 MHz	DL1: 2.5 MHz
	DL2: 1940 MHz – 1945 MHz	DL2: 5 MHz
	DL3: 1957.5 MHz – 1965 MHz	DL3: 7.5 MHz
7	UL: 2525 MHz – 2540 MHz	UL: 15 MHz
	DL: 2645 MHz – 2660 MHz	DL: 15 MHz

Fuente: Los autores.

6.2.1.1 Escenario 1. Combinación CA_2A-5A. De acuerdo a la combinación cero descrita en el Cuadro 24, combinación inter-banda CA_2A-5A, en el primer escenario se tienen 2 bandas de frecuencias diferentes, en la cual se utilizan las bandas 2 (1900 MHz) y 5 (850 MHz). Según la combinación planteada por la normatividad, se podría alcanzar un máximo de 30 MHz de ancho de banda, sin embargo, el operador Claro tiene asignado máximo 11 MHz en la banda 5 y 7.5 MHz en la banda 2, por lo cual de acuerdo a esto, el operador podría alcanzar una combinación máxima de 15 MHz tanto para el enlace ascendente como el descendente. La combinación se realizaría con la suma de las portadoras a partir de las frecuencias UL: 824 MHz– 835 MHz y DL: 869 MHz - 880 MHz sobre la cual se pueden tomar 10 MHz de espectro continuo en cada enlace de la banda 5 y sobre las frecuencias UL: 1860 MHz – 1865 MHz y DL: 1940 MHz – 1945 MHz en la banda 2 con el fin de obtener los 5 MHz para un total de 15 MHz de CA en cada enlace.

6.2.1.2 Escenario 2. Combinación CA_5A-7A. De acuerdo a la combinación cero descrita en el Cuadro 24, combinación inter-banda CA_5A-7A, en este escenario se tienen 2 bandas de frecuencias diferentes, en la cual se utilizan las bandas 5 (850 MHz) y 7 (2500 MHz). Según la combinación planteada por la normatividad, se podría alcanzar un máximo de 30 MHz de ancho de banda, sin embargo, el operador Claro tiene asignado máximo 11 MHz en la banda 5 y 15 MHz en la banda 7, por lo cual de acuerdo a esto, el operador podría alcanzar una combinación máxima de 25 MHz tanto para el enlace ascendente como el descendente. La combinación se realizaría con la suma de las portadoras a partir de las frecuencias UL: 824 MHz– 835 MHz y DL: 869 MHz - 880 MHz sobre la cual se pueden tomar 10 MHz de espectro continuo en cada enlace de la banda 5 de los 11 MHz con los que cuenta el operador y sobre las frecuencias UL: 2525 MHz – 2540 MHz y DL: 2645 MHz – 2660 MHz en la banda 7 con el fin de obtener el bloque completo de 15 MHz para un total de 25 MHz de CA en cada enlace.

6.2.1.3 Escenario 3. Combinación CA_2A-2A. De acuerdo a la combinación descrita en el Cuadro 26, combinación intra-banda no contigua con dos sub bloques dentro de la misma banda, CA_2A-2A, se tienen 3 bloques de frecuencias en la misma banda (1900 MHz), en la cual se utilizan dos de los fragmentos asignados al operador Claro. Según la combinación planteada por la normatividad, se podría alcanzar un máximo de 40 MHz de ancho de banda en *downlink*, sin embargo, el operador Claro tiene asignado tres bloques de frecuencias de 2.5 MHz, 5 MHz y 7.5 MHz en la misma banda (banda 2), de los cuales según la normatividad solo se pueden utilizar dos bloques con anchos de banda superiores a los 5 MHz únicamente en *downlink*. De acuerdo a lo anterior, el operador podría alcanzar una combinación máxima de 10 MHz en el enlace descendente. Para el enlace ascendente no se podría realizar la combinación de dos portadoras dentro de la misma banda de 1900 MHz, debido a que la actual normatividad de la 3GPP, *release* 12, aun no la soporta.

Con base en el Cuadro 27, para el enlace descendente, la combinación se realizaría con la suma de los bloques 2 y 3, consistentes en las frecuencias DL2: 1940 MHz – 1945 MHz con el bloque DL3: 1957.5 MHz – 1965 MHz. Sobre este último bloque, solo se utilizarán 5 MHz de ancho de banda, obteniendo 10 MHz en total de CA para este enlace. En esta caso se logra evidenciar que sobre el bloque de frecuencias número 3 de *downlink* (DL3) no se está realizando total uso del bloque de

frecuencias, pues se están tomando solo 5 MHz de los 7.5 MHz del fragmento de espectro, dejando por fuera un bloque de 2.5 MHz, que se podría aprovechar si la distribución de espectro para este operador fuera diferente y por lo menos para este bloque se tuvieran un bloque completo de 10 MHz asignados. De otro lado, para el enlace ascendente no se podría realizar la combinación en la misma banda, debido a que no se encuentra contemplada en la normatividad de la 3GPP.

6.2.1.4 Escenario 4. La opción de inter-banda para 3 bandas no es posible utilizarla para este operador, puesto que la combinación de las bandas 2, 5 y 7 no está soportada en el release 12 de la normatividad 3GPP.

6.2.2 Movistar - Colombia Telecomunicaciones S.A. Actualmente, el operador Colombia Telecomunicaciones SA – Movistar, tiene asignados 25 MHz de espectro radioeléctrico en la banda 5, 30 MHz en la banda 2 y 30 MHz en la banda 4, como se muestra en el Cuadro 28. Acorde con los topes reglamentados que se estipulan en el decreto 2980 de 2011, el operador Movistar no tendría que realizar devolución de espectro dado que no sobrepasa los topes permitidos, por lo cual se podrían presentar los siguientes escenarios ante una eventual implementación de *Carrier Aggregation* por parte del operador móvil.

Cuadro 28. Distribución de espectro para el operador Movistar

BANDA	FRECUENCIAS	ANCHO DE BANDA TOTAL POR BLOQUE
5	UL1: 835 MHz – 845 MHz	UL1: 10 MHz
	UL2: 846.5 MHz – 849 MHz	UL2: 2.5 MHz
	DL1: 880 MHz - 890 MHz	DL1: 10 MHz
	DL2: 891.5 MHz - 894 MHz	DL2: 2.5 MHz
2	UL1: 1867.5 MHz – 1877.5 MHz	UL1: 10 MHz
	UL2: 1885 MHz – 1890 MHz	UL2: 5 MHz
	DL1: 1947.5 MHz – 1957.5 MHz	DL1: 10 MHz
	DL2: 1965 MHz – 1970 MHz	DL2: 5 MHz
4 (Banda AWS)	UL: 1725 MHz – 1740 MHz	UL: 15 MHz
	DL: 2125 MHz – 2140 MHz	DL: 15 MHz

Fuente: Los autores.

6.2.2.1 Escenario 1. Combinación CA_2A-4A. De acuerdo a las combinaciones relacionadas en el Cuadro 24, para este escenario se presentan 2 posibles combinaciones: en la primera se obtendría un ancho de banda total de 20 MHz y en el segundo un BW de 25 MHz, siendo este último el más beneficioso al ofrecer mayor ancho de banda para ofrecer mejores servicios de datos. En esta segunda combinación, se tienen 2 bandas de frecuencias diferentes, en la cual se utilizan las bandas 2 (1900 MHz) y 4 (banda AWS). Según la combinación planteada por la normatividad, se podría alcanzar un máximo de 40 MHz de ancho de banda, sin embargo, el operador Movistar tiene asignado máximo 10 MHz en la banda 2 y 15 MHz en la banda 4, por lo cual de acuerdo a esto, el operador podría alcanzar una combinación máxima de 25 MHz tanto para el enlace ascendente como el descendente. La combinación se realizaría con la suma de los

bloques completos de las portadoras de las bandas 2 y 4 a partir de las frecuencias UL1: 1867.5 MHz – 1877.5 MHz con UL: 1725 MHz – 1740 MHz, resultando en 25 MHz de espectro continuo en el enlace ascendente y sobre las frecuencias DL1: 1947.5 MHz – 1957.5 MHz con DL: 2125 MHz – 2140 MHz con las cuales se obtienen 25 MHz en el enlace descendente.

6.2.2.2 Escenario 2. Combinación CA_2A-5A. De acuerdo al Cuadro 24, para este escenario se presentan 2 posibles combinaciones: en la primera se obtendría un ancho de banda total de 15 MHz y en el segundo un BW de 20 MHz, siendo este último el que mayor ancho de banda ofrece. En esta segunda combinación, se tienen 2 bandas de frecuencias diferentes, en la cual se utilizan las bandas 5 (850 MHz) y 2 (1900MHz). Según la combinación planteada por la normatividad, se podría alcanzar un máximo de 30 MHz de ancho de banda, sin embargo, el operador Movistar tiene asignado máximo 10 MHz en la banda 5 y 10 MHz en la banda 2, por lo cual de acuerdo a esto, el operador podría alcanzar una combinación máxima de 20 MHz tanto para el enlace ascendente como el descendente. La combinación se realizaría con la suma de dos bloques de frecuencias completos de las bandas 2 y 5 a partir de las frecuencias UL1: 1867.5 MHz – 1877.5 MHz con UL1: 835 MHz – 845 MHz resultando en 20 MHz de espectro continuo en el enlace ascendente y sobre las frecuencias DL1: 1947.5 MHz – 1957.5 MHz con DL1: 880 MHz - 890 MHz con las cuales se obtienen 20 MHz en el enlace descendente.

6.2.2.3 Escenario 3. Combinación CA_4A-5A. De acuerdo al Cuadro 24, para este escenario se presentan 2 posibles combinaciones: en la primera se obtendría un ancho de banda total de 20 MHz y en el segundo un BW de 25 MHz, siendo este último el que utiliza por completo dos bloques de espectro radioeléctrico. En esta segunda combinación, se tienen 2 bandas de frecuencias diferentes, en la cual se utilizan las bandas 4 (AWS) y 5 (850 MHz). Según la combinación planteada por la normatividad, se podría alcanzar un máximo de 30 MHz de ancho de banda, sin embargo, el operador Movistar tiene asignado máximo 15 MHz en la banda AWS y 10 MHz en la banda 5, por lo cual de acuerdo a esto, el operador podría alcanzar una combinación máxima de 25 MHz tanto para el enlace ascendente como el descendente. La combinación se realizaría con la suma de las portadoras de las bandas 4 y 5 a partir de las frecuencias UL: 1725 MHz – 1740 MHz con UL1: 835 MHz – 845 MHz resultando en 25 MHz de espectro continuo en el enlace ascendente y sobre las frecuencias DL: 2125 MHz – 2140 MHz con DL1: 880 MHz - 890 MHz con las cuales se obtienen 25 MHz en el enlace descendente.

6.2.2.4 Escenario 4. Combinación CA_2A-2A. De acuerdo a la combinación descrita en el Cuadro 26, combinación intra-banda no contigua con dos sub bloques dentro de la misma banda, CA_2A-2A, se tienen 2 bloques de frecuencias en la misma banda (1900 MHz), en la cual se utilizan dos de los fragmentos asignados al operador Movistar. Según la combinación planteada por la normatividad, se podría alcanzar un máximo de 40 MHz de ancho de banda en *downlink*, sin embargo, el operador Movistar tiene asignado dos bloques de frecuencias de 5 MHz y 10 MHz en la misma banda (banda 2), de los cuales según la normatividad solo se pueden utilizar dos bloques con anchos de banda superiores a los 5 MHz. De acuerdo a lo anterior, el operador podría alcanzar una combinación máxima de 15 MHz únicamente para el enlace descendente. Con base en el Cuadro 28, para el enlace descendente, la combinación se realizaría con la suma de los

bloques 1 y 2, consistentes en las frecuencias DL1: 1947.5 MHz – 1957.5 MHz con el bloque DL2: 1965 MHz – 1970 MHz, obteniendo 15 MHz en total de CA. Para el enlace ascendente no se podría realizar la combinación debido a que no se encuentra contemplada en la normatividad de la 3GPP.

6.2.2.5 Escenario 5. Combinación CA_2A-4A-5A. De acuerdo al Cuadro 25, combinación inter-banda con 3 bandas CA_2A-4A-5A, el operador Movistar podría realizar combinación de sus 3 bandas de espectro radioeléctrico asignadas, bandas 2 (1900 MHz), 4 (AWS) y 5 (850 MHz). Según la combinación planteada por la normatividad, se podría alcanzar un máximo de 50 MHz de ancho de banda únicamente en el enlace descendente. Para el enlace ascendente no se encuentra contemplada esta combinación con estas 3 bandas de frecuencias.

El operador Movistar tiene asignado máximo 15 MHz en la banda AWS, 10 MHz en la banda 5 y 10 MHz en la banda 2, por lo cual de acuerdo a esto, el operador podría alcanzar una combinación máxima de 35 MHz, que de acuerdo a la normatividad 3GPP, solo aplicarían para el enlace descendente, en la que se puede utilizar hasta 3 portadoras diferentes. Para alcanzar este máximo ancho de banda, se toman de forma completa tres portadoras en el enlace descendente de las tres bandas de frecuencias, sumando los bloques DL1: 880 MHz - 890 MHz, DL1: 1947.5 MHz – 1957.5 MHz y DL: 2125 MHz – 2140 MHz obteniendo un total de 35 MHz de ancho de banda. En el enlace ascendente no está contemplada esta combinación.

6.2.3 Tigo - Colombia Móvil. Actualmente, el operador Colombia Móvil -Tigo, tiene asignados 55 MHz de espectro radioeléctrico en la banda 2 y 30 MHz en la banda 4, para un total de 85 MHz, como se muestra en el Cuadro 29, lo anterior sin tener en cuenta la fusión Tigo – UNE la cual sobrepasa el tope de 85 MHz en bandas altas (reglamentados en el decreto 2980 de 2011), con un total de 50 MHz adicionales asignados al operador UNE. La Superintendencia de Industria y Comercio mediante resolución 24527 del 15 de abril de 2014, le otorgó al nuevo operador un tiempo límite para deshacerse del espectro que excede el tope de espacio radioeléctrico en bandas altas, es decir 50 MHz de espectro. En diciembre de 2015, según la cadena de noticias Caracol Radio⁵⁷, se conoció la aprobación de la junta directiva de la Empresa UNE-EPM Telecomunicaciones en la que informa que devolverá tres bandas de frecuencias a la Nación, como parte del proceso de fusión con la compañía de telecomunicaciones Colombia Móvil – Tigo. La devolución estará conformada por las bandas en las frecuencias 2500 MHz a 2525 MHz y de 2620 MHz a 2645MHz, otorgadas mediante la Resolución 1177 de 2010 del Ministerio, para un total de 50 MHz de espectro.

Con base en lo expuesto anteriormente, se podrían presentar los siguientes escenarios ante una eventual implementación de *Carrier Aggregation* por parte del operador Colombia Móvil – Tigo, de acuerdo a las bandas de frecuencias que tiene asignado actualmente este operador sin tener en cuenta las bandas con las que cuenta el operador UNE producto de la fusión y que serán devueltas al Ministerio de las tecnologías de la información y las Comunicaciones MINTIC.

⁵⁷ Caracol Radio. UNE devolverá tres bandas de espectro a la Nación tras fusión con Tigo. [En línea]. 2015. [10-dic-2015] Disponible en: http://caracol.com.co/emisora/2015/12/10/medellin/1449773947_866826.html

Cuadro 29. Distribución de espectro para el operador Tigo

BANDA	FRECUENCIAS	ANCHO DE BANDA TOTAL POR BLOQUE
2	UL1: 1850 MHz - 1852.5 MHz	UL1: 2.5 MHz
	UL2: 1855 MHz – 1860 MHz	UL2: 5 MHz
	UL3: 1890 MHz – 1910 MHz	UL3: 20 MHz
	DL1: 1930 MHz – 1932.5 MHz	DL1: 2.5 MHz
	DL2: 1935 MHz – 1940 MHz	DL2: 5 MHz
	DL3: 1970 MHz – 1990 MHz	DL3: 20 MHz
4 (Banda AWS)	UL1: 1740 MHz – 1755 MHz	UL1: 15 MHz
	DL1: 2140 MHz – 2155 MHz	DL1: 15 MHz

Fuente: Los autores.

6.2.3.1 Escenario 1. Combinación CA_2A-2A. De acuerdo a la combinación descrita en el Cuadro 26, combinación intra-banda no contigua con dos sub bloques dentro de la misma banda, CA_2A-2A, el operador cuenta con 3 bloques de frecuencias en la misma banda (1900 MHz), en la cual se utilizan dos de los fragmentos asignados al operador Tigo. Según la combinación planteada por la normatividad, se podría alcanzar un máximo de 40 MHz de ancho de banda en *downlink*, sin embargo, el operador Tigo tiene asignado tres bloques de frecuencias de 2.5 MHz, 5 MHz y 20 MHz en la misma banda (banda 2), de los cuales según la normatividad solo se pueden utilizar dos bloques con anchos de banda superiores a los 5 MHz. De acuerdo a lo anterior, el operador podría alcanzar una combinación máxima de 25 MHz únicamente para el descendente.

Con base en el Cuadro 29, para el enlace descendente, la combinación se realizaría con la suma de los bloques 2 y 3, consistentes en las frecuencias DL2: 1935 MHz – 1940 MHz con el bloque DL3: 1970 MHz – 1990 MHz, obteniendo 25 MHz en total de CA. Para el enlace ascendente no se podría realizar la combinación debido a que no se encuentra contemplada en la normatividad de la 3GPP.

6.2.3.2 Escenario 2. Combinación CA_2A-4A. De acuerdo al Cuadro 24, para este escenario se presentan 2 posibles combinaciones: en la primera se obtendría un ancho de banda total de 20 MHz y en el segundo un BW de 35 MHz, siendo este último el más beneficioso al utilizar los bloques de mayor magnitud de espectro. En esta segunda combinación, se tienen 2 bandas de frecuencias diferentes, en la cual se utilizan los bloques de mayor tamaño y de forma completa de las bandas 2 (1900 MHz) y 4 (banda AWS).

Según la combinación planteada por la normatividad, se podría alcanzar un máximo de 40 MHz de ancho de banda en cada enlace, sin embargo, el operador Tigo tiene asignado máximo 20 MHz en la banda 2 y 15 MHz en la banda 4, por lo cual de acuerdo a esto, el operador podría alcanzar una combinación máxima de 35 MHz tanto para el enlace ascendente como el descendente. La combinación se realizaría con la suma de los bloques completos de las bandas 2 y 4 a partir de las frecuencias UL3: 1890 MHz – 1910 MHz con UL1: 1740 MHz – 1755 MHz resultando en 35 MHz de espectro continuo en el enlace ascendente y sobre las frecuencias DL3: 1970 MHz – 1990 MHz con DL1: 2140 MHz – 2155 MHz con las cuales se obtienen 35 MHz en el enlace descendente.

7. RECOMENDACIONES A LOS OPERADORES MÓVILES

Con base en el análisis de *Carrier Aggregation* realizado a los principales operadores móviles en Colombia, expuesto en el capítulo anterior y teniendo en cuenta la distribución actual de frecuencias del espectro radioeléctrico asignados, en el Cuadro 30 se resumen la posibles combinaciones que los operadores podrían adoptar en caso de implementar esta funcionalidad en sus redes de telecomunicaciones móviles. Para el caso de las combinaciones CA_2A-2A y CA_2A-4A-5A solo está contemplada la combinación de CA para en enlace descendente.

Cuadro 30. Anchos de banda máximos alcanzados con Carrier Aggregation en el enlace ascendente y descendente

Configuración de CA en downlink	Configuración de CA en uplink	ANCHO DE BANDA MÁXIMO ALCANZADO CON CA EN CADA ENLACE		
		Claro	Movistar	Tigo
CA_2A-2A	-	10 MHz	15 MHz	25 MHz
CA_2A-4A	CA_2A-4A	N/A	25 MHz	35 MHz
CA_2A-5A	CA_2A-5A	15 MHz	20 MHz	N/A
CA_4A-5A	CA_4A-5A	N/A	25 MHz	N/A
CA_5A-7A	CA_5A-7A	25 MHz	N/A	N/A
CA_2A-4A-5A	-	N/A	35 MHz	N/A
N/A: No es posible realizar la combinación debido a que el operador no tiene espectro en alguna de las bandas de frecuencias de la combinación.				

Fuente: Los autores.

Del Cuadro 30, se puede deducir que entre todos los operadores es posible realizar 6 combinaciones de CA utilizando las bandas de frecuencias 2 (1900 MHz), 4 (AWS), 5 (850 MHz) y 7 (2500 MHz), las cuales se encuentran asignadas actualmente en diferentes porciones o bloques de espectro. A continuación se realizará una recomendación a cada operador, tomando como base la información consignada en el Cuadro 30.

7.1 CLARO -COMUNICACIÓN CELULAR SA

De acuerdo al análisis realizado, se observó que el operador Claro, cuenta con tres escenarios posibles, de los cuales, en el mejor de los casos puede combinar dos bandas de frecuencias alcanzando un máximo de 25 MHz sobre las bandas 5 y 7 y adicional podría combinar dos bloques en la banda 2 (1900 MHz), las cuales se encuentran fragmentadas, alcanzando un máximo ancho de banda de 10 MHz. En este último caso, no se hace total uso del bloque de frecuencias, pues se están tomando solo 5 MHz de los 7.5 MHz de un fragmento de espectro, dejando por fuera un bloque de 2.5 MHz, que se podrían aprovechar si la distribución de espectro para este operador fuera diferente y por lo menos se contara con un bloque completo de 10 MHz asignados.

Por lo cual, se recomienda al operador Claro, realizar la combinación de las bandas 5 (850 MHz) y 7 (2500 MHz), combinación CA_5A-7A, la cual estaría sujeta a una posible liberación de los

servicios de tecnologías GSM y UMTS que se prestan actualmente en estas bandas, explotando el uso de este espectro para servicios de LTE (voz, datos y multimedia). Con esta combinación, y debido a las características que posee el uso de bandas de menor frecuencias, en este caso 850 MHz, el operador tendría la ventaja de optimizar las condiciones de propagación de la señal y fácil penetración en zonas suburbanas y de menor densidad poblacional, así como para mejorar la cobertura en interiores. Con la banda de 2500 MHz, como indica la GSMA⁵⁸, la cual es una asociación que se dedica a apoyar la estandarización, despliegue y promoción del sistema telefónico móvil de GSM, se proporciona la capacidad necesaria para satisfacer la demanda de altas velocidades de transferencia de datos del gran número de usuarios de las zonas urbanas, aeropuertos y otros lugares muy concurridos.

Adicional, en relación al ancho de banda actual (15 MHz) que tiene asignado actualmente Claro en la banda 7 para servicios de LTE, para cada enlace, con la implementación de esta funcionalidad en las bandas 5 y 7, el operador estaría ampliando sus servicios con 10 MHz adicionales de ancho de banda, es decir obteniendo un ancho de banda total de 25 MHz. En cuanto a la velocidad de descarga que se puede llegar a alcanzar con 25 MHz de espectro en CA mediante la combinación de dos portadoras, el *release* indica que se podrían conseguir hasta 187.5 Mbps en *downlink* (valor teórico). Con este mismo ancho de banda, en pruebas realizadas por el operador móvil de telecomunicaciones Taiwán Mobile localizado en Taiwán, se lograron velocidades de hasta 180 Mbps en el enlace de bajada.

De otro lado, se recomendaría al operador Claro, que ceda o devuelva, de ser posible, una parte de sus frecuencias asignadas en la banda 5 (850 MHz), si desea participar en el proceso de subasta del espectro que se espera para el año 2016, en la que se incluirá parte de la banda de 700 MHz (banda 28), conocida también como la banda del dividendo digital, conformado por el espectro radioeléctrico en la banda UHF resultante de la transición de la televisión analógica a digital⁵⁹, debido a que en cumplimiento a los topes de asignación de frecuencias del espectro radioeléctrico reglamentados en el decreto 2980 de 2011 consistentes en 30 MHz de espectro en las bandas bajas, el operador no podría participar de la subasta, ya que está muy cerca de alcanzar el tope en las bandas bajas, con solo 5 MHz para llegar al máximo permitido.

Con la participación en esta subasta y de resultar adjudicatario en algunos de los bloques subastados de la banda del dividendo digital, el operador tendría la ventaja de optimizar las condiciones de propagación de la señal y fácil penetración en interiores debido a las características que posee el uso de bandas de menor frecuencia.

⁵⁸ GSMA. La banda de 2.6 GHz: Oportunidad para lograr una banda ancha móvil global. [En línea]. 2014. [12-enero-2016]. Disponible en: <http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2012/07/Spectrum-The-2-6GHz-band-Opportunity-for-global-mobile-broadband-Spanish.pdf>

⁵⁹ AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. Op. Cit., p. 28

7.2 MOVISTAR - COLOMBIA TELECOMUNICACIONES SA

El operador Movistar, según análisis realizado, cuenta con 5 posibles escenarios, siendo el único operador que cuenta con la mayor cantidad de opciones de combinación de portadoras en CA. En el mejor escenario, es decir sobre el cual el operador puede desplegar sus servicios alcanzando el mayor ancho de banda, se logran obtener 35 MHz únicamente para el enlace descendente, dado que para el enlace ascendente y según el *release* 12, aún no está contemplada esta combinación. Con esta combinación, inter-Banda de 3 bandas diferentes, bandas 2 (1900 MHz), 4 (AWS) y 5 (850 MHz), el operador lograría utilizar los fragmentos de espectro radioeléctrico asignados actualmente en cada una de las bandas de forma completa, sin embargo quedarían dos fragmentos de espectro sin utilizar, uno de 2.5 MHz en la banda 5 y otro de 5 MHz en la banda 2. Si el operador contara con una mejor distribución en su espectro y por ejemplo el fragmento de 10 MHz en la banda 2 tuviera los 5 MHz adicionales que se encuentran en el otro bloque de frecuencias, se lograría obtener 15 MHz, que sumados con los 15 MHz en la banda AWS y los 10 MHz en la banda 5, se obtendría un ancho de banda total en CA de 40 MHz sobre el cual se podrían ofrecer mejores capacidades y experiencia de navegación al usuario.

Por lo cual, se recomienda al operador Movistar, realizar la combinación de las bandas 2 (1900 MHz), 4 (AWS) y 5 (850 MHz), combinación CA_2A-4A-5A, la cual estaría sujeta a una posible liberación de los servicios de tecnologías GSM y UMTS que se prestan actualmente en algunos de los bloques asignados en las bandas 2 y 5, explotando el uso de este espectro para servicios de LTE. Con esta combinación, el operador tendría la ventaja de optimizar las condiciones de propagación de la señal en zonas suburbanas y fácil penetración en interiores debido a las características que posee el uso de bandas de menor frecuencias, en este caso 850 MHz.

Por otro lado, al contar con frecuencias altas, como comenta la GSMA⁶⁰, con la banda 4 (AWS) y 2 (1900 MHz), se tiene mayor capacidad en la transmisión de datos, lo que resulta en beneficios para todos los usuarios, puesto que contribuye a satisfacer la demanda de datos de los usuarios y mejorar la calidad. Adicional, el consumo de batería de los terminales móviles sería mayor debido al incremento en la potencia de transmisión por las frecuencias utilizadas.

En relación al ancho de banda actual (15 MHz) que tiene asignado actualmente Movistar en la banda 4 (AWS) para servicios de LTE, con la implementación de esta funcionalidad empleando la combinación de inter-banda de 3 bandas (2, 4 y 5), el operador estaría ampliando sus servicios con 20 MHz adicionales de ancho de banda, es decir obteniendo un ancho de banda total de 35 MHz para el enlace descendente, convirtiéndose hasta el momento en el operador que mayor ancho de banda puede ofrecer utilizando la funcionalidad de CA con los fragmentos de espectro radioeléctrico que tiene actualmente asignados. En cuanto a la velocidad de descarga que se puede llegar a alcanzar con 35 MHz de espectro en CA mediante la combinación de tres portadoras, el *release* indica que se podrían conseguir hasta 262.5 Mbps en *downlink* (valor

⁶⁰ GSMA. Situación actual de AWS en las Américas. [En línea]. 2014. [13-enero-2016]. Disponible en: <http://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2014/05/GSMA-Latam-AWS-Americas-reporte.pdf>

teórico). Con este mismo ancho de banda, en pruebas realizadas por el operador móvil Entel en Chile, se lograron velocidades de hasta 250 Mbps en el enlace de bajada y en pruebas efectuadas por el operador NTT Docomo en Japón, se lograron 262.5 Mbps de velocidad en el mismo enlace.

De otro lado, se recomendaría al operador Movistar, que ceda o devuelva, de ser posible, una parte de sus frecuencias asignadas en la banda 5 (850 MHz), si desea participar en el proceso de subasta del espectro que se espera para el año 2016, en la que se incluirá parte de la banda de 700 MHz (banda 28 - banda del dividendo digital), debido a que en cumplimiento a los toques de asignación de frecuencias reglamentados en el decreto 2980 de 2011, el operador no podría participar de la subasta, ya que está muy cerca de alcanzar el tope en las bandas bajas, con solo 5 MHz para llegar al máximo permitido.

Con la participación en esta subasta y de resultar adjudicatario en algunos de los bloques subastados de la banda del dividendo digital, el operador tendría la ventaja de optimizar las condiciones de propagación de la señal y fácil penetración en interiores debido a las características que posee el uso de bandas de menor frecuencia.

7.3 TIGO - COLOMBIA MÓVIL

El operador Tigo, según análisis realizado, cuenta con 2 posibles escenarios y es el único operador de Telecomunicaciones Móviles en Colombia que cuenta con el mayor bloque de espectro asignado en la banda 2 (1900 MHz), con 20 MHz en cada enlace, beneficiándolo en una posible implementación de CA. De otro lado, dado que cuenta con solo 2 escenarios de posibles combinaciones, consigue obtener 35 MHz de ancho de banda con la combinación inter-banda de 2 bandas, es decir el mismo ancho de banda alcanzado por el operador Movistar con la combinación inter-banda de 3 bandas. En el mejor escenario, es decir sobre el cual el operador puede desplegar sus servicios alcanzando el mayor ancho de banda, se logran obtener 35 MHz tanto para el enlace ascendente como el descendente, lo anterior con la combinación inter-Banda de 2 bandas diferentes, bandas 2 (1900 MHz) y 4 (AWS). Con esta combinación, el operador lograría utilizar los fragmentos de espectro radioeléctrico asignados actualmente en cada una de las bandas de forma completa, sin embargo quedarían dos fragmentos de espectro sin utilizar, uno de 2.5 MHz en la banda 2 y otro de 5 MHz en la banda 2.

Por lo cual se recomienda al Operador Tigo, realizar la combinación de las bandas 2 (1900 MHz) y 4 (AWS), combinación CA_2A-4A, la cual estaría sujeta a una posible liberación de los servicios de tecnologías GSM y UMTS que se prestan actualmente en el bloque de mayor ancho de banda de la banda 2, explotando el uso de este espectro para servicios de LTE. Con esta combinación de bandas 2 y 4, el operador tendría mayor capacidad para satisfacer la demanda de altas velocidades de transferencia de datos del gran número de usuarios de las zonas urbanas y muy concurridas, lo que resulta en beneficios para todos los usuarios y mejoras en la calidad.

De otro lado, en relación al ancho de banda actual (15 MHz) que tiene asignado actualmente Tigo en la banda 4 (AWS) para servicios de LTE en cada enlace, con la implementación de esta funcionalidad empleando la combinación de inter-banda de 2 bandas (2 y 4), el operador estaría ampliando sus servicios con 20 MHz adicionales de ancho de banda, es decir obteniendo un ancho de banda total de 35 MHz, el mismo ancho de banda del operador Movistar tanto para el enlace ascendente como el descendente. En cuanto a la velocidad de descarga que se puede llegar a alcanzar con 35 MHz de espectro en CA mediante la combinación de dos portadoras, el *release* indica que se podrían conseguir hasta 262.5 Mbps en *downlink* (valor teórico), velocidades que se obtuvieron en pruebas realizadas por los operadores móviles Entel en Chile y NTT Docomo en Japón.

8. RECOMENDACIÓN A LA REGULACIÓN COLOMBIANA

En este capítulo se describen las recomendaciones a la regulación colombiana, de acuerdo al análisis realizado de CA para los principales operadores móviles del país. Esta recomendación se encuentra subdividida en dos partes: la primera es la reorganización de los bloques de frecuencias de algunas bandas y el segundo, una propuesta de modificación de los topes máximos permitidos para asignación de espectro radioeléctrico.

8.1 REORGANIZACIÓN DE FRECUENCIAS

De acuerdo al análisis de *Carrier Aggregation* realizado a los principales operadores móviles en Colombia expuesto en capítulos anteriores, se recomienda realizar las siguientes reorganizaciones de frecuencias, con el fin de obtener una mejor segmentación y aprovechamiento del espectro en función de las bandas de frecuencias asignadas actualmente. Adicional, y dada la próxima subasta del espectro radioeléctrico, se propone una segmentación de bloques de frecuencias para la banda del dividendo digital con el fin de garantizar la participación de múltiples operadores móviles, en la cual puedan resultar adjudicatarios de bloques completos de 10 MHz o 15 MHz en cada enlace.

8.1.1 Banda 5 (850 MHz). De acuerdo al análisis realizado anteriormente, la asignación actual de frecuencias en el espectro radioeléctrico para esta banda no se encuentra muy bien distribuida, puesto que operadores como Claro y Movistar, si intentan implementar la funcionalidad de CA en sus redes, tendrían serias limitaciones debido a que poseen bloques de espectro fragmentados. En el caso de Claro uno de 11 MHz y otro de 1.5 MHz, y en el caso de Movistar uno de 10 MHz y otro de 2.5 MHz, en cada uno de los enlaces respectivamente, por lo cual para el máximo aprovechamiento del bloque de espectro lo ideal sería que el bloque se encontrara de forma completa, con el fin de evitar que queden bloques restantes sin utilizar y con poco ancho de banda para ofrecer servicios móviles, pues en el caso de Claro, al tomar 10 MHz de los 11 disponibles, quedaría un bloque fragmentado del tamaño de 1 MHz y adicional quedaría otro bloque de 1.5 MHz, el cual no se utilizaría en la combinación de esta banda, pues solo se utilizaría el bloque de mayor ancho de banda para lograr una mejor combinación al implementar CA con otro bloque de gran tamaño en otra banda.

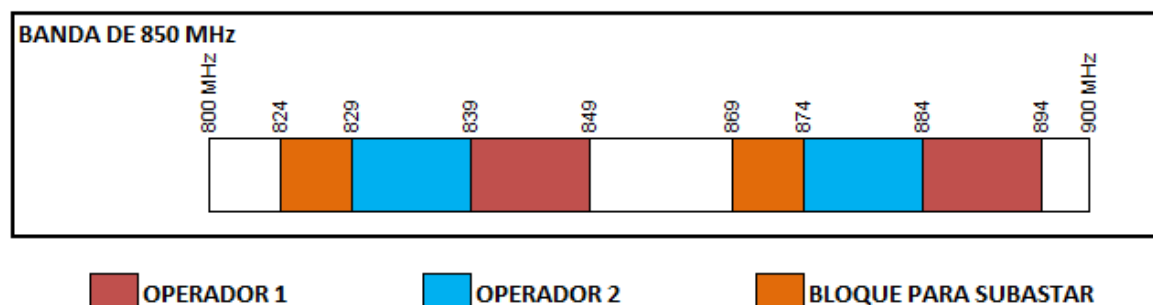
Para el caso de Movistar, se utilizaría el bloque completo que tiene asignado, es decir el bloque de 10 MHz y quedaría un bloque fragmentado de 2.5 MHz, el cual no se podría utilizar en otra combinación en la misma banda, pues la normatividad de la 3GPP para *Carrier Aggregation* no tiene contemplada la combinación intra-banda no contigua en la banda 5.

Para el caso de esta banda, analizando el máximo ancho de banda permitido según la normatividad de la 3GPP para CA, el cual corresponde a 10 MHz, y teniendo en cuenta que esta banda de frecuencias está conformada por 25 MHz en el enlace ascendente (824 MHz – 849 MHz)

y 25 MHz en el descendente (869 MHz- 894 MHz), se recomienda a la Agencia Nacional del Espectro, como ente encargado de realizar la planeación, atribución, vigilancia y control del Espectro Radioeléctrico en Colombia, así como brindar la asesoría técnica para la gestión eficiente del mismo y de la gestión técnica del espectro radioeléctrico, realizar una reorganización en la asignación de frecuencias sobre esta banda, permitiéndoles a los operadores Claro y Movistar que cada uno cuente con un ancho de banda continuo de 10 MHz en cada uno de los enlaces (*downlink* y *uplink*) y que cada uno de los operadores ceda los 2.5 MHz de espectro que tienen asignados tanto en *uplink* como en *downlink* con el fin de que se pueda formar un nuevo bloque continuo con un ancho de banda de 5 MHz en cada enlace.

La reorganización sobre la banda 5 (850 MHz) que se propone a la ANE (Agencia Nacional Del Espectro) es la que se muestra en la Figura 21, donde se recomienda establecer dos bloqueos continuos de 10 MHz de ancho de banda y uno de 5 MHz en la parte inferior de cada enlace, con el fin de que al implementar la funcionalidad de *Carrier Aggregation* se puedan tomar los bloques completos de espectro de 5 MHz o 10 MHz sin que el operador quede con bloques fragmentados y/o desperdiciados. Esto último se puede presentar en razón a que el tamaño del bloque no se puede utilizar de forma completa debido a que sobrepasa o no alcanza los valores de ancho de banda recomendados para implementar CA, o porque se utiliza el bloque de mayor ancho de banda y, el operador por contar con varios bloques de espectro asignados en la misma banda, queda con otros fragmentados, por lo cual, la reorganización de la banda, permitiría a los operadores utilizar de forma completa los recursos disponibles del espectro que tienen asignados.

Figura 21. Recomendación de reorganización de la banda 5



Fuente: Los autores.

8.1.2 Banda 2 (1900 MHz). De igual forma, la asignación actual de frecuencias en el espectro radioeléctrico para esta banda no se encuentra muy bien distribuida, puesto que el Operador Tigo es el único que cuenta con un bloque continuo de 20 MHz y otros dos bloques separados, uno de 2.5 MHz y otro de 5 MHz. Claro posee tres bloques fragmentados, un bloque de 7.5 MHz, otro de 5 MHz y el ultimo de 2.5 MHz. Movistar posee dos bloques, uno de 10 MHz, y el otro de 5 MHz, por lo cual se tendrían limitaciones en caso de implementación de CA.

Para el máximo aprovechamiento del bloque de espectro lo ideal sería que el bloque se encontrara de forma completa, con el fin de evitar que queden bloques restantes sin utilizar y con poco ancho de banda para ofrecer servicios móviles, pues en el caso de Claro, no se podrá utilizar en ninguna

combinación el bloque de 2.5 MHz (según normatividad de la 3GPP para CA), y si desea utilizar el bloque de 7.5MHz, solo podrá tomar 5 MHz, quedando un bloque fragmentado del tamaño de 2.5 MHz.

De otro lado, el operador Movistar cuenta con 2 bloques fragmentados, uno de 5 MHz y otro de 10 MHz, siendo una ventaja para el operador, puesto que se está cumpliendo con los mínimos valores que recomienda la normatividad y al realizar CA se utilizaría alguno de los bloques de forma completa o los dos para el caso de combinación intra-banda no contigua. Sin embargo, sería recomendable que el operador contara con el bloque continuo de la suma de los dos bloques que tiene asignado, es decir de 15 MHz en cada enlace, para poder disponer de un bloque de mayor tamaño si intenta realizar CA en combinación de 3 bandas o en cualquier otra combinación.

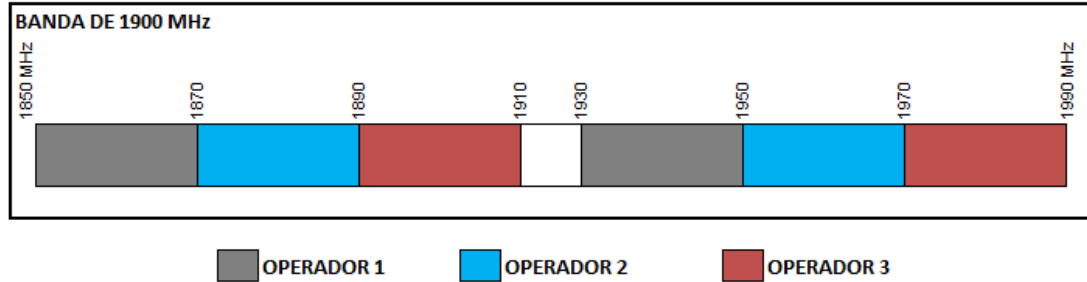
El operador Tigo cuenta con 3 bloques fragmentados, uno de 20 MHz, otro de 5 MHz y un último bloque de 2.5 MHz. De utilizar el bloque de mayor tamaño, es decir el bloque de 20 MHz, podría realizar combinaciones con otras bandas, sin embargo quedarían 2 bloques fragmentados, uno de 5 MHz y otro de 2.5 MHz, este último es difícil de combinar dado que con el bloqueo de 20 MHz podría alcanzar un mayor ancho de banda en la combinación con otras bandas.

Para el caso de esta banda, analizando el máximo ancho de banda permitido según la normatividad de la 3GPP para CA, el cual corresponde a 20 MHz, y teniendo en cuenta que esta banda de frecuencias está conformada por 55 MHz en el enlace ascendente y 55 MHz en el descendente, con posibilidad de ampliación a 60 MHz en cada enlace de acuerdo a la asignación de espectro radioeléctrico de los 5 MHz disponibles sobre esta banda, subasta que se estima para el año 2016, se recomienda a la Agencia Nacional del Espectro, realizar una reorganización en la asignación de frecuencias sobre esta banda, permitiéndoles a los operadores Claro, Movistar y Tigo contar con un ancho de banda continuo de 20 MHz en cada uno de los enlaces (*downlink* y *uplink*) y que el operador Tigo ceda los 7.5 MHz de espectro que tienen asignados tanto en *uplink* como en *downlink* con el fin de que se pueda generar una mejor distribución del espectro en bloques continuos con un mejor ancho de banda.

La reorganización sobre la banda 2 (1900 MHz) que se propone a la ANE es la que se muestra en la Figura 22, donde se recomienda establecer tres bloqueos continuos de 20 MHz de ancho de banda en cada enlace, los cuales se obtienen de los 55 MHz actuales con los 5 MHz que se planean subastar, con el fin de que al implementar la funcionalidad de *Carrier Aggregation*, si el operador lo desea, pueda hacer uso del máximo ancho de banda permitido para realizar combinación con otra banda, es decir tomando el bloque completo de espectro de 20 MHz, sin que resten bloques fragmentados.

Las frecuencias entre los 1910 MHz y 1930 MHz son frecuencias reservadas para la banda de guarda, por lo cual no se pueden utilizar para evitar temas de interferencia entre las diferentes transmisiones. Cabe resaltar, que esta recomendación de reorganización de bandas se hace teniendo en cuenta los tres operadores móviles que actualmente operan en esta banda del espectro radioeléctrico.

Figura 22. Recomendación de reorganización de la banda 2

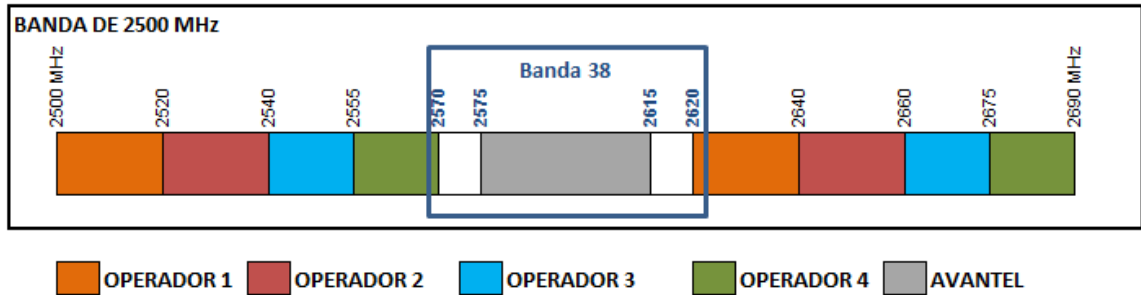


Fuente: Los autores.

8.1.3 Banda 7 (2500 MHz). Actualmente la banda 7 tiene asignados 25 MHz para el operador Une, 15 MHz a Claro, 15 MHz a Avantel en modo FDD y adicional un bloque continuo de 40 MHz en el modo TDD, es decir el mismo bloque de frecuencias tanto para la transmisión y recepción de señales. Sin tener en cuenta el bloque de espectro de 40 MHz en TDD asignado al operador Avantel, dado que corresponde a la banda 38, se podría decir que la asignación en esta banda se encuentra bien distribuida, ya que cada uno de los operadores cuenta con bloques continuos, lo que les permite implementar la funcionalidad de CA utilizando este ancho de banda con otra de sus bandas asignadas. Sin embargo, se encuentra un bloque que aún no ha sido atribuido a ningún operador de 15 MHz en cada enlace, y que se espera sea asignado en el próximo proceso de subasta. De otro lado, el operador UNE, debido a la fusión que tuvo con el operador Tigo, deberá devolver o ceder a un tercero 50 MHz de espectro en total, de los 135 MHz que reúnen entre ambos operadores, en razón a que con la actual reglamentación de los toques establecidos por el gobierno excede en 50 MHz para las bandas altas.

Con base en lo anterior, teniendo en cuenta la devolución de espectro que realizará próximamente UNE y además de los 30 MHz próximos a subastar, se propone la reorganización de la banda que se muestra en la Figura 23, en donde se cuenta con 4 bloques continuos, dos bloques de 20 MHz y dos de 15 MHz en cada enlace, sin tener en cuenta el bloque de espectro que tiene asignado actualmente el operador Avantel con 40 MHz en modo TDD que corresponde a la banda 38 en el modo TDD (2570 MHz – 2620 MHz).

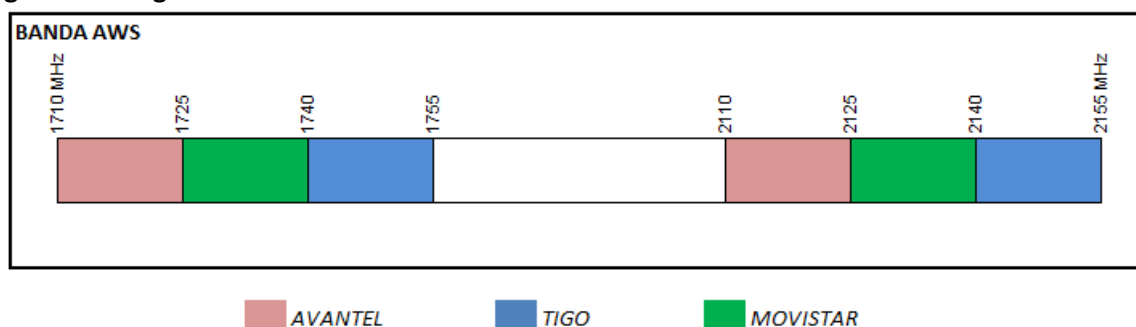
Figura 23. Recomendación de reorganización de la banda 7



Fuente: Los autores.

8.1.4 Banda 4 (AWS). En cuanto a la banda 4 (AWS), se considera que se encuentra muy bien distribuida en bloques de 15 MHz para cada enlace, en donde los operadores Avantel, Movistar y Tigo poseen las mismas porciones de asignación de espectro, con un ancho de banda total asignado por cada uno en 30 MHz (15 MHz en *uplink* y 15 MHz en *downlink*), lo cual permite que los operadores puedan contar con un bloque continuo de la magnitud de 15 MHz y que en caso de una posible implementación de CA, se pueda combinar fácilmente con otros fragmentos de espectro en la banda 5 o 2, combinación que se lograría, en caso de que en estas últimas bandas se contara con una asignación y un mejor tamaño de bloque de espectro y del orden de los 5 MHz en adelante, en múltiplos de 5 hasta los 20 MHz. En la Figura 24 se muestra la asignación actual de frecuencias para la banda AWS.

Figura 24. Asignación actual de frecuencias en la banda AWS



Fuente: Los autores.

8.1.5 Banda 700 MHz (dividendo digital). Debido a la transición de la televisión analógica a digital, en la que se liberaron las frecuencias del espectro radioeléctrico de la banda UHF, lo cual permitió obtener un dividendo en forma de nuevas frecuencias disponibles, que se conoce como Dividendo Digital, la Agencia Nacional del Espectro, mediante resolución 668 del 12 de diciembre de 2012, atribuyó la banda del dividendo digital conformada por las frecuencias entre los 698 y 806 MHz para uso exclusivo de los servicios de telecomunicaciones móviles terrestres 4G.

El 31 de mayo de 2012, el Ministerio de las Tecnologías de la Información y las comunicaciones y la Agencia Nacional del Espectro, informaron que Colombia adoptaría el estándar de canalización FDD propuesto por la *Asia-Pacific Telecommunity* APT para la banda del dividendo digital. Esta canalización corresponde a la banda 28 especificada en la documentación de la 3GPP y dispone de dos bloques continuos pareados de 45 MHz cada uno. El primero en las frecuencias 703 MHz a 748 MHz para las transmisiones en *uplink* y el otro entre 758 MHz a 803 MHz para las transmisiones en *downlink*, con una banda de guarda de 10 MHz entre los bloques pareados⁶¹.

Con base en la adopción del estándar de canalización anterior, y dado que se cuenta con 90 MHz en total de espectro, los cuales están distribuidos en 45 MHz para *downlink* y 45 MHz para *uplink*,

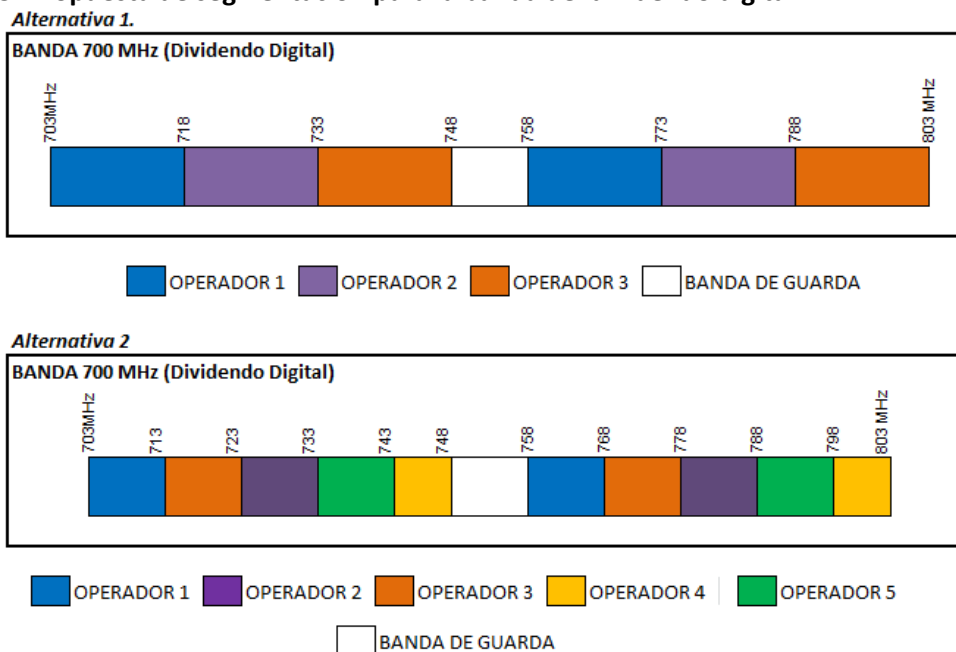
⁶¹ AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. Op. Cit., p. 29-30

se recomienda a la ANE segmentar la banda del dividendo digital (700 MHz) en 3 bloques continuos, cada uno de 15 MHz de espectro en cada enlace (2x15 MHz), con el cual podrían participar en la subasta hasta 3 operadores móviles, como se muestra en la alternativa 1 de la Figura 25.

En la alternativa 2 de la misma figura, se muestra la recomendación para la segmentación de la banda en 4 bloques de (2x10 MHz) y un bloque de (2x 5 MHz). Con esta distribución podrían operar en esta banda de frecuencias hasta 5 operadores de telecomunicaciones móviles.

Con la asignación actual de frecuencias, y dada la normatividad de la 3GPP para *Carrier Aggregation* en la que solo se encuentra contemplada la combinación CA 7A-28A, banda 7 con banda 28, los operadores que podrían estar interesados en aplicar CA con esta banda serian Claro, Avantel y Directv, solo en el caso de que resulten adjudicatarios sobre algún bloque de espectro en esta banda.

Figura 25. Propuesta de segmentación para la banda del dividendo digital



Fuente: Los autores.

8.2 MODIFICACIÓN DE LOS TOPES EL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO

De otro lado, y debido al próximo proceso de subasta del espectro que se espera para el año 2016, en la que se incluirá parte de la banda de 700 MHz (banda 28 -banda del dividendo digital), así como también de la banda de 900 MHz, 2500 MHz y 1900 MHz, se hace necesario recomendar a la ANE, como ente encargado de la gestión y la planeación del espectro radioeléctrico, que

modifique los topes de asignación de frecuencias reglamentados en el decreto 2980 de 2011 consistentes en 30 MHz de espectro en las bandas bajas (frecuencias entre 698 MHz y 960 MHz) y de 85 MHz en las bandas altas (frecuencias entre 1710 MHz y 2690 MHz), debido a que los operadores móviles Claro y Movistar no podrían participar de la subasta en razón a que se encuentran muy cerca de alcanzar los topes establecidos en las bandas bajas, pues cada operador cuenta con 25 MHz de asignación, lo cual se traduciría en una gran desventaja, pues esta banda de frecuencias ha sido vista a nivel mundial, como una oportunidad para ampliar la cobertura de los servicios de banda ancha, y además, como comenta la ANE⁶², esta porción de espectro permite llegar con cobertura de Internet a zonas rurales y apartadas del territorio nacional, así como la implementación de redes y servicios de telecomunicaciones eficientes a bajo costo, debido a las características de propagación de las frecuencias.

En el Cuadro 31 se muestra la asignación actual del espectro en bandas bajas y altas de los principales operadores móviles de Colombia.

Cuadro 31. Total de asignación actual del espectro en bandas altas y bajas

Operador	Total espectro asignado en bandas altas	Total espectro asignado en bandas bajas
Claro	60 MHz	25 MHz
Movistar	60 MHz	25 MHz
Tigo	135 MHz *	0
*La Superintendencia de Industria y Comercio mediante resolución 24527 del 15 de abril de 2014, le otorgó al nuevo operador (UNE) un tiempo límite para deshacerse del espectro que excede el tope de espacio radioeléctrico en bandas altas, es decir 50 MHz de espectro.		

Fuente: Los autores.

De acuerdo a los topes de asignación de frecuencias reglamentados en el decreto 2980 de 2011, Claro y Movistar están cerca de alcanzar el tope de 30 MHz en bandas bajas. Sin embargo es de tener en cuenta, que del total de frecuencias asignadas actualmente a los operadores, solo la banda 5 (850 MHz) corresponde a frecuencias bajas, y las bandas 2 (1900 MHz), 4 (AWS) y 7(2500 MHz) son consideradas según el decreto como frecuencias altas, por lo cual, si se tiene en cuenta que en el próximo proceso de subasta se ofertará una parte de la banda 28 (700 MHz - dividiendo digital) y la banda de 900 MHz, de un total para asignar de 112 MHz (90 MHz en la banda 28 y 22 MHz en la banda de 900 MHz), correspondientes a las frecuencias bajas, se le recomienda a la ANE incrementar los topes de asignación a por lo menos 60 MHz, con el fin de que los operadores que están por alcanzar el tope puedan participar en al menos un bloque continuo de 15 MHz en cada enlace sobre la banda de los 700 MHz y en un bloque de 5 MHz en cada enlace en la banda de 900 MHz, lo anterior siempre y cuando la distribución de frecuencias sea en bloques de 2x15 MHz en banda 28 (1700 MHz) y 2x5 MHz en banda 900 MHz.

⁶² AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. Op. Cit., p. 28

En bandas altas, de acuerdo a la asignación que se tendrá en la próxima subasta, en la cual se ofertará una parte de la banda 7 (2500 MHz) compuesta por un total de 40 MHz de espectro (sin tener en cuenta los 50 MHz que debe devolver el operador móvil UNE), y sobre la banda 2 (1900 MHz) con 5 MHz disponibles, se recomienda a la ANE incrementar el tope de asignación en bandas altas a por lo menos 105 MHz, con el fin de garantizar participación de todos los operadores, bien sea en esta o en próximas subastas. El objetivo del incremento en los topes se hace con el fin de que los operadores móviles puedan contar con al menos 10 MHz de espectro en cada enlace, sin embargo esto dependerá de los tamaños de bloque que se definan en las respectivas bandas.

Por otro lado, si se tuviera en cuenta los 50 MHz que devolverá el operador UNE, y bajo una buena organización y segmentación de la banda 7, se tendrían en total 90 MHz de espectro, los cuales se podrían dividir en tres bloques de 2x15 MHz en cada enlace, con lo cual se obtendría un mayor ancho de banda que permitiría generar mejores velocidades de descarga de acuerdo a las combinaciones que pueda realizar el operador.

La recomendación para elevar los topes de espectro vigentes se hace en razón a que el aumento promueve la prestación de nuevos servicios, mejorando los anchos de banda ofrecidos a los usuarios para optimizar la calidad y experiencia de navegación, además, permite a los actuales y nuevos operadores de telecomunicaciones móviles tener claras las condiciones futuras del mercado del espectro en bandas de tercera y cuarta generación.

De otro lado para poder satisfacer las crecientes necesidades de ancho de banda y calidad que implica la adopción de nuevas tecnologías y mayor ancho de banda para el transporte de la información, se requiere que a medida que se van asignando diversos bloques de frecuencias del espectro radioeléctrico, los topes máximos también aumenten, en razón a que los proveedores de servicios de telecomunicaciones móviles actuales puedan expandir sus redes y aumentar su capacidad.

Si no se amplían estos topes, y considerando tanto el crecimiento de usuarios como de tráfico, se compromete la capacidad de la red debido a las limitantes de orden técnico y regulatorio en la asignación de espectro, lo que se traduce en barreras para los usuarios pertenecientes a las redes de los operadores actuales que buscan y exigen acceder a más y mejores servicios.

Finalmente, de acuerdo a las últimas subastas que generó más operadores de telecomunicaciones móviles, se cuenta con una nueva composición del mercado que podría influir en los topes de espectro radioeléctrico establecidos tanto en bandas altas como bajas, por lo cual se recomendaría a la ANE estudiar el enfoque actual y estipular un tope de frecuencias por operador teniendo en cuenta los recursos que se tienen disponibles en cada una de las bandas, sin olvidar que las bandas bajas son unas de las más apetecidas por los operadores debido a sus características de propagación lo cual se traduce en bajos costos al tener que desplegar menor cantidad de estaciones base. Además es importante crear mecanismos que garanticen la participación de todos los operadores móviles en próximos procesos de asignación de espectro,

permitiendo la igualdad de condiciones para acceder al espectro, sin perjudicar la prestación del servicio, el despliegue de nuevas tecnologías de telecomunicaciones en el país y/o la calidad del servicio móvil, entre otros.

9. CONCLUSIONES

- Si los operadores deciden adoptar este tipo de funcionalidad, como solución a la creciente demanda de tráfico que cada vez exige mayores anchos de banda y como opción para optimizar el uso del espectro, aumentando significativamente el rendimiento de datos, y brindando una experiencia inigualable al cliente, primero el ente regulador en Colombia, en este caso la ANE, debería realizar una reorganización de espectro a fin de asignar bloques con anchos de banda continuos entre los 5 MHz y los 20 MHz, con el objetivo que todos los operadores móviles en Colombia posean anchos de banda, en lo ideal superiores a 5 MHz y en las mismas proporciones, evitando la distribución actual que contiene bloques asignados y únicos desde los 1.5 MHz. Esta redistribución y mejor planificación en la ordenación del espectro radioeléctrico debería realizarse en mayor proporción en las bandas 2 (1900 MHz) y 5 (850 MHz) debido a que en estas bandas es donde se presenta la mayor cantidad de fragmentos, con asignaciones unitarias de 1.5 MHz, 2,5 MHz e inclusive 7.5 MHz, con el fin de fomentar de esta forma la inversión y adopción de nuevas tecnologías y funcionalidades que con la evolución de la tecnología cada vez requiere mayores anchos de banda debido a las exigencias de los altos volúmenes de información y de las novedosas aplicaciones dedicadas a todo tipo de contenidos multimedia.
- Para algunos operadores se evidencia que los bloques de frecuencias no se encuentran muy bien distribuidos para hacer uso de la funcionalidad de *Carrier Aggregation*, pues se presentan bloques con tamaños de 1.5 MHz y 2.5 MHz los cuales no son posibles de utilizar en CA debido a la normatividad recomendada por la 3GPP, en la que no se contempla el uso de bandas de frecuencias con anchos de banda menores a 5 MHz. Con las bandas asignadas actualmente, solo se contemplan combinaciones con bloques continuos entre los 5 MHz y los 20 MHz en múltiplos de 5 MHz (5MHz, 10 MHz, 15MHz o 20MHz).
- La funcionalidad de *Carrier Aggregation* podría verse limitada en Latinoamérica debido a las diferentes combinaciones que plantea la 3GPP en los *release* 11 y 12, en razón a que en mayor proporción se encuentran planteadas e implementadas por países de Europa, Asia, África y Norte América, los cuales manejan bandas de frecuencias diferentes a la región, por lo cual se presentarían serias barreras con la implementación de esta funcionalidad dada la poca variedad de combinaciones.
- En cuanto al diseño de terminales móviles, los costos pueden ser elevados, dado que es necesario incluir varios transmisores y receptores tanto en la estación base como en el UE, pues para el caso de *Carrier Aggregation* en configuración inter-banda no contigua se debe asegurar la comunicación a través de varias portadoras.
- Teniendo en cuenta las recomendaciones de la 3GPP, ante una posible implementación de *Carrier Aggregation* por parte de los operadores en sus redes móviles, y mediante la combinación estratégica de bloques de espectro en bajas y altas frecuencias, se permitiría que los operadores

puedan con las bandas de menor frecuencias asegurar mejores condiciones de propagación en zonas suburbanas y fácil penetración en interiores, contribuyendo en temas de cobertura en sitios críticos y con las frecuencias de las bandas altas, proporcionar la capacidad necesaria para satisfacer la demanda de altas velocidades de transferencia de datos del gran número de usuarios en zonas urbanas y muy concurridas.

- De acuerdo al estudio realizado, en la que se observó que algunos operadores están cerca de superar los topes máximos tanto en bandas bajas (Claro y Movistar) como en bandas altas (Tigo), se le recomienda a la ANE incrementar los topes de asignación a por lo menos 60 MHz en bandas bajas, con el fin de que estos operadores puedan participar en próximos procesos de subastas, en razón a que el aumento de los topes promueve la prestación de nuevos servicios, mejorando los anchos de banda ofrecidos a los usuarios para optimizar la calidad y experiencia de navegación.
- Para poder satisfacer las crecientes necesidades de ancho de banda y calidad que implica la adopción de nuevas tecnologías y mayor ancho de banda para el transporte de la información, se requiere que a medida que se van asignando diversos bloques de frecuencias del espectro radioeléctrico, los topes máximos también aumenten, en razón a que los proveedores de servicios de telecomunicaciones móviles actuales puedan expandir sus redes y aumentar su capacidad. Además, es importante que los bloques de espectro a asignarse sean en bloques contiguos y de un considerable ancho de banda, a fin de aprovechar al máximo la posibilidad que ofrece la funcionalidad de *Carrier Aggregation*.
- Si no se amplían estos topes, y considerando tanto el crecimiento de usuarios como de tráfico, se compromete la capacidad de la red debido a las limitantes de orden técnico y regulatorio en la asignación de espectro, lo que se traduce en barreras para los usuarios pertenecientes a las redes de los operadores actuales que buscan y exigen acceder a más y mejores servicios.

BIBLIOGRAFÍA

4G AMÉRICAS. Understanding 3GPP release 12: Standards for HSPA+ and LTE enhancements. Resumen ejecutivo. [En línea]. 2015. [13-Enero-2016]. Disponible en: http://www.4gamericas.org/files/6614/2359/0457/4G_Americas_-_3GPP_Release_12_Executive_Summary_-_February_2015.pdf

------. Inside 3GPP Release 13: Understanding the standards for HSPA+ and LTE-Advanced Enhancements. Resumen ejecutivo. [En línea]. 2015. [13-Enero-2016]. Disponible en: http://www.4gamericas.org/files/3714/4224/8256/Executive_Summary_3GPP_Release_13_final.pdf

AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO. Proceso de selección objetiva para asignación de espectro radioeléctrico en las bandas 700 MHz (Dividendo digital), 900 MHz, 1900 MHz y 2500 MHz para servicios móviles terrestres. Documento de consulta pública. Bogotá. 2015. 22 p.

BECVAR, Zdenek; MACH, Pavel y PRAVDA, Iván. Redes Móviles. 1 ed. República Checa: Improvet. 68-69 p. ISBN 978-80-01-05307-2.

BORCHERT, Markus. Taiwán Mobile selects NSN as sole supplier for its LTE-Advanced network. [En línea]. 2014. [14-nov-2015]. Disponible en: <http://networks.nokia.com/de/news-events/press-room/press-releases/taiwan-mobile-selects-nsn-as-sole-supplier-for-its-lte-advanced-network>

Caracol Radio. UNE devolverá tres bandas de espectro a la Nación tras fusión con Tigo. [En línea]. 2015. [10-dic-2015] Disponible en: http://caracol.com.co/emisora/2015/12/10/medellin/1449773947_866826.html

CARDONA, Narcis; OLMOS, Juan; GARCÍA, Mario y MONSERRAT, José. 3GPP LTE: Hacia la 4G móvil. 1 ed. Barcelona: Marcombo Universitaria. 2001. p. 25

CARVILL, Jon. Qualcomm, EE and Huawei Successfully Complete LTE Category 9 Carrier Aggregation Interoperability Testing. [En línea]. 2014. [2-nov-2015] Disponible en: <https://www.qualcomm.com/news/releases/2014/12/22/qualcomm-ee-and-huawei-successfully-complete-lte-category-9-carrier>

CASTRO, Felipe. Eficiencia económica de la renovación de las licencias de telefonía móvil en Colombia. 2015. Bogotá: Fedesarrollo Centro de Investigación económico y social. 2015. 29 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS TELECOMUNICACIONES. Resolución 2720 de 2004 (30 de diciembre de 2004) Por la cual se atribuyen y asignan unas bandas de frecuencias radioeléctricas para la operación y prestación del Servicio de Telefonía Móvil Celular y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá., 2005.

-----,-----,Resolución 508 de 2005 (28 de marzo de 2005). Bogotá., 2005.

-----,-----,Decreto 4722 de 2009 (2 de diciembre de 2009). Por el cual se establecen los criterios para el otorgamiento de espectro radioeléctrico en la banda de 1850 MHz a 1990 MHz para el servicio móvil terrestre y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial. Bogotá., 2009.

-----,-----,Resolución 443 de 2010 (16 de abril de 2010). Diario Oficial. Bogotá., 2013.

-----,-----, Resolución 449 de 2013 (11 de marzo de 2013). Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para otorgar permisos para el uso de hasta 255 MHz de espectro en las bandas de 1850 a 1990 MHz, 1710 a 1755 MHz pareada con 2110 a 2155 MHz y 2500 a 2690 MHz para la operación y prestación del servicio móvil terrestre. Diario Oficial. Bogotá., 2013.

-----,-----, Resolución 598 de 2014 (27 de marzo de 2014). Por medio de la cual se renueva un permiso para uso del espectro radioeléctrico a Comunicación Celular SA Comcel SA. Diario Oficial. Bogotá., 2014.

-----,-----,Resolución 597 de 2014 (27 de marzo de 2014). Por medio de la cual se renueva un permiso para uso del espectro radioeléctrico a Colombia Telecomunicaciones S.A ESP. Diario Oficial. Bogotá., 2014.

COLOMBIA. SUPERINTENDENCIA DE INDUSTRIA Y COMERCIO. Resolución 24527 de 2014 (15 de abril de 2014) Por la cual se condiciona una operación de integración. Diario Oficial. Bogotá., 2014.

COMES, Ramón A. y ÁLVAREZ, Francisco B. LTE: NUEVAS TENDENCIAS EN COMUNICACIONES MÓVILES. Fundación Vodafone España: España, 2010. ISBN: 84-934740-4-5

COX, Christopher. An Introduction LTE. 2 ed. Reino Unido: John Wiley, 2014. p.313.

EIKO, Seidel. LTE-A Carrier Aggregation Enhancements in release 11. Munich: Nomor Research. 2012. p.1

ERICSSON. Ericsson and Telstra achieve world's first 450Mbps in commercial LTE-A network demonstration. [En línea]. 2015. [2-nov-2015]. Disponible en: http://www.ericsson.com/news/140515-ericsson-and-telstra-achieve-worlds-first-450mbps-in-commercial-lte-a-network-demonstration_244099437_c

GOLDSTEIN, Phil. AT&T lights up LTE Advanced carrier aggregation in Chicago, other markets. [En línea]. 2014. [13-nov-2015]. Disponible en: <http://www.fiercewireless.com/story/att-lights-lte-advanced-carrier-aggregation-chicago-other-markets/2014-03-07>

GSA. Evolution to LTE report. 4G market and technology update. [En línea]. 2015. [14-ene-2016]. Disponible en: http://www.malaysianwireless.com/wp-content/uploads/2015/07/GSA-Evolution_to_LTE_report_21-July-2015.pdf

GSMA. La banda de 2.6 GHz: Oportunidad para lograr una banda ancha móvil global. [En línea]. 2014. [12-enero-2016]. Disponible en: <http://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2012/07/Spectrum-The-2-6GHz-band-Opportunity-for-global-mobile-broadband-Spanish.pdf>

------. Situación actual de AWS en las Américas. [En línea]. 2014. [13-enero-2016]. Disponible en: <http://www.gsma.com/latinamerica/wp-content/uploads/2014/05/GSMA-Latam-AWS-Americas-reporte.pdf>

KIYOSHIMA, Kohei; TAKIGUCHI, Takahiro; KAWABE, Yasuhiro y SASAKI, Yusuke. Commercial Development of LTE-Advanced applying Advanced C-RAN Architecture. En: NTT Docomo Technical Journal. Octubre, 2015, vol. 17, no. 2, p. 10-18

MERA, Roberto. Entel Chile comienza las primeras pruebas de LTE-A Carrier Aggregation en Latinoamérica. [En línea]. 2015. [2-nov-2015]. Disponible en: <http://pisapapeles.net/entel-chile-comienza-las-primeras-pruebas-de-lte-a-carrier-aggregation-en-latinoamerica/>

MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. Estudio de requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE. España: Top Optimized Technologies. p 7-8.

MOHAMMED, Al-Shibli; MOHAMED, Habaebi y JALEL, Chebil. Carrier Aggregation in Long Term Evolution Advanced. En: IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), 2012 World Congress on (Jul. 16 2012-Jul. 17 2012: Shah Alam, Selangor). Memorias. IEEE: 2012. p. 155

MOORHEAD, Patrick. Carrier Aggregation: An Opportunity For Operators And Handset OEMs, But Is The U.S. Behind. [En línea]. 2015. [13-nov-2015]. Disponible en: <http://www.forbes.com/sites/patrickmoorhead/2015/07/27/carrier-aggregation-an-opportunity-for-operators-and-handset-oems-but-is-the-u-s-behind/>

MUNIZAGA, Jonathan. Entel realizó la primera prueba LTE Advanced Carrier Aggregation en Chile y LATAM. [En línea]. 2015. [2-nov-2015]. Disponible en: <https://www.wayerless.com/2015/09/entel-realizo-la-primera-prueba-lte-advanced-carrier-aggregation-en-chile-y-latam/>

NOKIA. LTE release 12 and beyond. [En línea]. 2014. [15-Enero-2016]. Disponible en: http://networks.nokia.com/system/files/document/nokia_lte_a_evolution_white_paper.pdf

NÚÑEZ CORAL, Jimmy Alexander. Diseño de una red de nueva generación LTE-A para una zona urbana en Bogotá bajo el estándar 3gpp y la recomendación ITU-R M.1457. Tesis de grado Magister en Ingeniería - Telecomunicaciones. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Departamento de Sistemas e Industrial, 2013. 15 p.

PARKER, Tammy. Ericsson, Telstra demo 300 Mbps downlink via carrier aggregation. [En línea]. 2013. [2-nov-2015]. Disponible en: <http://www.fiercewireless.com/tech/story/ericsson-telstra-demo-300-mbps-downlink-carrier-aggregation/2013-12-07>

RAMÓN, Agustí; ÁLVAREZ, Francisco; CASADEVALL, Fernando; FERRUS, Ramón; PÉREZ, Jordi y SALLENT, Oriol. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. España: Fundación Vodafone España. 2010. p. 46

REINIKAINEN, Antti. Performance evaluation of LTE-Advanced Carrier Aggregation. Trabajo de grado Master en Ciencias de la Tecnología. Espoo: School of Electrical Engineering. Communications Engineering. 2015. p.9-10.

ROJAS, Orlando. Terminó la subasta por 25 MHz de espectro en 1900 MHz. [En línea].2015. [2-nov-2015] Disponible en internet: <http://www.evaluamos.com/2011/internal.php?load=detail&id=12595>.

SAHOTA, Dawinderpal. SK Telecom develops LTE-A tri-band carrier aggregation technology. [En línea]. 2014. [2-nov-2015] Disponible en: <http://telecoms.com/215472/sk-telecom-develops-lte-a-tri-band-carrier-aggregation-technology/>

SERRA, Carlos; MARANTE, Francisco. Arquitectura general del sistema LTE. En: Revista digital de las tecnologías de la información y las comunicaciones. Agosto 2013. Vol 12. No 2. p. 83.

TELEFÓNICA. Telefónica muestra velocidades de hasta 375 Mbps en su red comercial LTE-Advanced en el Mobile World Congress. [En línea]. 2015. [10-nov-2015]. Disponible en: <https://www.telefonica.com.mx/prensa/2015/marzo/Telefonica-muestra-velocidades-de-hasta-375-mbps-en-su-red-comercial-LTE-Advanced-en-el-Mobile-World-Congress>

The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 104 V10.2.0: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 36.104 version 10.2.0 Release 10). Francia: ETSI, 2011. 15p.

The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V11.4.0: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 11.4.0 Release 11). Francia: ETSI, 2013. 21-23p.

The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 136 101 V12.9.0: LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 12.9.0 Release 12). Francia: ETSI, 2015.

The 3rd Generation Partnership Project (3GPP). TS 36.300: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN). Overall description. Stage 2. [En línea]. Disponible en: <http://www.3gpp.org/dynareport/36300.htm>

TIWARI, Satish Kumar. Carrier Aggregation in LTE-ADVANCED. Tesis de grado Magister de tecnología de comunicación y redes. India: National Institute of Technology, Rourkela. Department of Electronics & Communication Engineering, 2014. 15 p.

TOMASI, Wayne. Sistemas de comunicaciones electrónicas. 4 ed. México: Pearson Educación. 2003. 484 p. ISBN 970-26-0316-1

ZHOU, Xiaojin y ZHANG Xinchang. LTE-Advanced Air Interface Technology. Carrier Aggregation. Taylor & Francis Group: New York, 2013. ISBN: 978-1-4665-0152-2.